Magnetische Messungen an Eisen-Vanadium-Legierungen mit Hilfe eines hochempfindlichen astatischen Torsionsmagnetometers.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer

hohen naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen

vorgelegt von

Reinhold Dieterle.

BIBLIOTHEEK RIJKS UNIV. LEIDEN

Leipzig 1919
Verlag von Johann Ambrosius Barth

Von der Fakultät angenommen
den 27. Februar 1919.

Referent: Prof. Dr. F. Paschen.

Sonderabdruck aus den „Annalen der Physik“,
Band 59, Heft 12, 1919.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig. 315

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Apparatur 5
1. Einleitung 5
2. Das neue störungsfreie Torsionsmagnetometer 6
3. Konstante des Magnetometers 13
4. Hilfsapparatur 16
5. Berechnungsformeln 19
6. Herstellung der Versuchsellipsoide 20
7. Entmagnetisierung 22
8. Versuchsanordnung 23
II. Magnetische Messungen an Eisen-Vanadium-Legierungen 25
9. Material 25
10. Stufenversuche 28
11. Magnetisierbarkeit der Vanadiumlegierungen nach der Herstellung der Ellipsoide (A) 35
12. Magnetisierbarkeit der ausgeglühten Legierungen (B) . . . 40
13. Magnetisierbarkeit der abgeschreckten Legierungen (C) . . 45
14. Magnetisierbarkeit der abermals geglühten Legierungen (D) und Zusammenstellung der Messungsergebnisse 50
15. Zusammenfassung 52

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553613_0144

I. Apparatur.

1. Einleitung.

Die durch eine Spule bewirkte Magnetiesierung eines zu untersuchenden Körpers mißt man bei der magnetometrischen Methode bekanntlich an der Ablenkung einer kleinen, leicht beweglich aufgehängten Magnetnadel. Die Wirkung der Spule selbst auf das Magnetometer wird kompensiert durch das Feld von einer oder mehreren Hilfsspulen. Der Probekörper hat hierbei die Gestalt eines Drahtes oder eines langgestreckten Ellipsoids oder zylindrischen Stabes und wird ausschließlich in zwei besonderen Lagen untersucht, nämlich senkrecht und parallel zum magnetischen Meridian, die man die erste und zweite Gaußsche Hauptlage nennt. Die erstere wird vorgezogen, weil hier die ablenkende Kraft doppelt so groß ist, wie im zweiten Falle; ferner wird eine störende Magnetisierung durch das Erdfeld vermieden. Die magnetometrische Messungsmethode ist noch in den letzten Jahren in sehr exakter und vielseitiger Weise vervollkommnet worden.[1])

Doch haben elektromagnetische Störungen durch elektrische Zentralen und Straßenbahnen diese Methode in ihrer Verwendbarkeit für feinere Messungen an vielen Orten sehr beschränkt oder gar unbrauchbar gemacht. Jede andere Methode zur exakten Untersuchung ferromagnetischen Materials besitzt aber für gewisse Zwecke solche Nachteile, daß das Magnetometer nicht vermißt werden kann. Es gelang lange Zeit nicht, obigen Mängeln abzuhelfen, da über den Verlauf der vagabundierenden Ströme und über eventuelle Weiterleitung derselben in

Diese Arbeit wurde mit Unterstützung der Robert Bosch-Stiftung ausgeführt.

1) J. G. Gray u. A. D. Roß, Ann. d. Phys. 33. p. 1413. 1910.

Gas-, Wasser-, Heizungs- und elektrischen Leitungen oder in Eisenträgern bis jetzt kaum etwas Genaueres ausgesagt werden kann. Wenn jedoch diese Störungen am Versuchsort in einer Höhe von etwa 1—2 m gleichförmig verlaufen, dann ist es möglich, durch Anwendung eines astatischen Magnetsystems Messungen auszuführen. Hierbei läßt man das ablenkende Feld in der Hauptsache nur auf einen Magneten wirken, der andere in obigem Abstand befestigte dient nur dazu, die Störungen unwirksam zu machen. Derartige störungsfreie Torsionsmagnetometer sind meines Wissens bis jetzt drei konstruiert worden, zwei von F. Kohlrausch und L. Holborn[1]), und eines dem ersten der beiden sehr ähnliches, für das Marburger Physikalische Institut.[2]) Ferner hat E. Haupt[3]) ein empfindliches, für manche technischen Zwecke sehr brauchbares, störungsfreies Instrument angegeben, da es aber aus verschiedenen Gründen für absolute Messungen ungeeignet und außerdem ganz anders konstruiert ist wie die obigen, so kommt dasselbe hier nicht weiter in Betracht.

Da nun das Stuttgarter Physikalische Institut beträchtlichen elektromagnetischen Störungen ausgesetzt ist, die durch reichlich vorhandene Leitungen in ihrer Wirkung begünstigt werden, so konnte hier für magnetische Messungen nur ein astatisches Magnetometer in Betracht kommen. Wie dasselbe zu bauen und inwieweit es brauchbar sein würde, war Sache des Versuchs.

2. Das neue störungsfreie Torsionsmagnetometer.

Da sich das störungsfreie Torsionsmagnetometer seit Jahren in der Reichsanstalt bewährt hat, so kann also bei elektromagnetischen Störungen, die am Versuchsort in etwa $1^1/_2$ m Höhe gleichförmig verlaufen, die magnetometrische Methode weiterhin verwendet werden. Doch haben die bis jetzt gebauten Instrumente auch manche Nachteile. Sie besitzen 60 mm lange und 7 mm dicke zylindrische Magnete, daher ist die Korrektion

1) F. Kohlrausch u. L. Holborn, Ann. d. Phys. **10**. p. 287. 1903 und **13**. p. 1054. 1904.

2) A. Semm, Inaug.-Diss. Marburg 1915. I. A.

3) E. Haupt, Elektrotechn. Zeitschr. **28**. p. 1069. 1907 und H. Jordan, Verh. d. D. Phys. Ges. **11**. p. 216. 1909.

wegen der Länge der Magnete groß. Kleinere Magnete erwiesen sich aber bei dieser Konstruktion als zu schwach, wie Versuche beim Marburger Magnetometer zeigten. Dann verursacht ihre Herstellung ziemlich viel Arbeit und Kosten, auch gelingt es nur mit besonderen Vorrichtungen, die starre Verbindung der zwei Magnetstäbe ganz gerade zu machen und dieselben senkrecht unter den Aufhängepunkt zu bringen. Dies ist aber absolut notwendig, weil der untere als Hauptstab verwendet wird. Außerdem ist das erste dieser Instrumente an der Zimmerdecke festgemacht, also nicht transportabel. Deshalb wurde ein zweites tragbares Instrument gebaut, das an verschiedenen Orten Berlins auch verschiedene Brauchbarkeit zeigte.[1]) Dieses Instrument hat auch den Vorzug, daß der obere Magnet als Hauptstab benutzt wird.

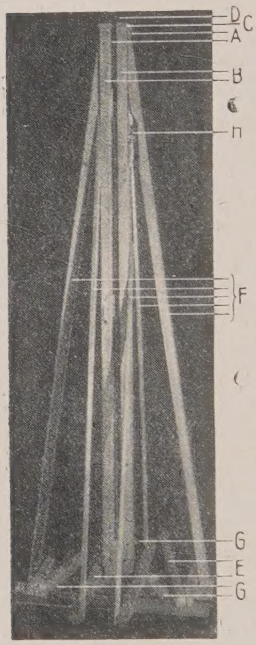
Nun hat aber H. du Bois[2]) mehrfach darauf hingewiesen, daß es besser wäre, möglichst kleine Magnete und Luftdämpfung zu verwenden. Ferner empfiehlt sich ein leichteres und einfacher gebautes Gehänge, damit an Stelle der Aufhängedrähte Quarzfäden benutzt werden können, wodurch größere Empfindlichkeit erreicht wird. Auf Veranlassung von Hrn. Prof. Dr. K. R. von Koch unternahm ich es, von diesen Gesichtspunkten aus die Konstruktion eines neuen Magnetometers zu versuchen.

Ich hielt es für zweckmäßig, mir zuerst ein Magnetometergestell zu bauen, das Versuche über die Wahl des Materials für die starre Verbindung und die Größe und den Abstand der Magnetnadeln zuließ. Dasselbe mußte also die bequeme Untersuchung von Gehängen bis mindestens 150 cm Länge gestatten.

Das Gestell (Fig. 1) fertigte ich aus Holzleisten von den Querschnitten 3×3 cm und 3×1 cm, die mit Messingschrauben zusammengehalten werden. Das Gerüst besteht aus zwei Leisten A von 180 cm Länge, die einen Abstand von 3 cm besitzen (etwas mehr wäre besser gewesen) und fest miteinander verbunden sind. Der Hohlraum zwischen ihnen wird auf beiden Seiten mittels Glasplatten ($40 \times 7{,}5 \times 0{,}5$ cm) abgeschlossen, die mit geschliffenen Schmalseiten aufeinander passen und durch fest-

1) F. Henning, Ann. d. Phys. **15**. p. 827. 1904.
2) H. du Bois, Ann. d. Phys. **9**. p. 942. 1902 und **11**. p. 611. 1903.

schraubbare Schienen B (3 × 1 cm) angepreßt werden. Deren Lockerung gestattet die Herausnahme einer oder mehrerer dieser Glasplatten. Am oberen Ende ist das Gerüst durch ein Holzbrett C mit aufgeschraubtem großem Torsionskopf D abgeschlossen, welcher durch ein Schraubengewinde die Verstellung des Gehänges in der Vertikalen gestattet. Das untere Ende des Gerüstes ist an einem Fuß E befestigt, an dessen 50 bzw. 60 cm langen Hauptleisten die schief aufwärts führenden Versteifungen F festgemacht sind, deren Länge so gewählt wurde, daß die Abnahme der Glasplatten nicht behindert wird. So besitzt das Gestell auch die nötige Stabilität. Das Ganze ruht auf drei Stellschrauben G aus Messing, deren Plätze so gewählt wurden, daß das Gestell auch auf die im Institut vorhandenen 40 × 40 cm großen Steinkonsole gestellt werden kann. Am oberen Teil wurde bei H noch eine Arretierungsvorrichtung angebracht, die zugleich die Auswechslung der Gehänge gestattete. Das Gestell entsprach den daran geknüpften Erwartungen.



Versuchsgestell.

Fig. 1.

Die zu verwendenden Magnetsysteme sollen bei geringem Gewicht großes magnetisches Moment besitzen. Als Material für dieselben benutzte ich Uhrfederstahl von den Querschnitten 0,2 × 1,0 mm bis 0,3 × 3,0 mm. Da die Größe und Konstanz des magnetischen Moments sehr von einem genügend großen Verhältnis von Länge zum Querschnitt abhängt[1]), so wurde als Magnetlänge 20 mm gewählt. Die Stahlfedern richtete ich unter Erwärmen gerade, härtete sie und brach sie dann in Stückchen von gewünschter Länge ab. Aus ihnen stellte ich eine Anzahl Systeme zusammen, indem ich verschieden viele Nadeln parallel und in gleichen Abständen voneinander mit

1) J. Klemencic, Wien. Ber. 108. p. 491 und 989. 1899 und 109. p. 242. 1900; Ann. d. Phys. 4. p. 319. 1901 und 6. 186. 1901.

Schellack auf eine dünne Glimmerscheibe aufklebte, bei einigen wurde die Rückseite entsprechend beklebt. Von jeder Art fertigte ich vier solcher Systeme. Diese magnetisierte ich zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten unter mehrmaligem Wechseln der Stromrichtung. Dann wurden sie einige Wochen gelagert. Das sonst übliche Anlassen kommt nach den Angaben von W. W. Coblentz[1]) bei kleinen Systemen wenig in Betracht. Bei der Prüfung auf ihre Brauchbarkeit zeigte sich, daß die leichteren Systeme mit den Magneten von kleinem Querschnitt am geeignetsten sind. Doch waren die Unterschiede bei gleicher Magnetlänge nicht groß, was für sehr kleine Systeme F. Paschen[2]) erstmals angegeben hat.

Nun handelte es sich darum, das Material, die Länge und Stärke der starren, möglichst leichten Verbindung der Magnetsysteme auszuwählen. Hierbei war mir die durch den Krieg bedingte Schwierigkeit oder gar Unmöglichkeit der Materialbeschaffung sehr hinderlich, der ganze praktische Teil der Arbeit hatte unter diesem Übel zu leiden, dessen Behebung öfters auch mit großem Zeitverlust verbunden war.

Zuerst probierte ich Aluminiumdraht von 1 mm Durchmesser. Derselbe wurde vertikal eingeklemmt, elektrisch erwärmt und durch angehängte Gewichte gerade gerichtet, was ganz gut gelang. Hierauf brachte ich zwei Magnetsysteme leicht dreh- und verschiebbar am oberen Ende des Drahtes auf beiden Seiten desselben an, die beiden andern wurden unten festgeklebt, so daß also die zwei Doppelsysteme gegeneinander verdreht und verschoben werden konnten, was zur Feststellung des richtigen Abstandes derselben und zur Astasierung notwendig ist.[3]) Einen Galvanometerspiegel von 1 cm Durchmesser befestigte ich leicht abnehmbar am unteren Drahtende, da ich das Gestell auf eine Steinsäule stellen wollte, wobei also das untere als Hauptsystem dient, auf welches das zu messende magnetische Feld einwirken soll. Bei diesen Arbeiten ließ sich eine Verbiegung des $1^1/_2$ m langen weichen Drahtes gewöhnlich nicht vermeiden. Auch wenn die Magnete zuerst befestigt und dann

1) W. W. Coblentz, Bull. Bur. of Stand. 4. p. 428. 1907/08.

2) F. Paschen, Zeitschr. f. Instr.-K. 13. p. 15. 1893; Wied. Ann. 48. p. 281. 1893.

3) F. Kohlrausch u. L. Holborn, Ann. d. Phys. 10. p. 290. 1903.

der Draht gerade gerichtet wurde, so war er es doch nicht mehr ganz, bis er im Gestell an einem der aus Quarzglas selbst gezogenen Quarzfäden hing. Deshalb benutzte ich das obere als Hauptsystem, da geringe Differenzen in der Zentrierung nur bei dem Hilfssystem nicht in Betracht kommen. Damit konnte das Gestell auf den Boden gestellt werden.

Zu Messungen war diese Anordnung noch nicht geeignet, denn das System wurde durch die Maschinen und Stromleitungen des Instituts manchmal um mehrere Skalenteile abgelenkt und hing selten ganz ruhig, ein Übel, das hier bei fast allen Präzisionsmessungen auftritt.[1]) Die Störungen durch die nächsten in etwa 100 m Entfernung steil aufwärts fahrenden Straßenbahnwagen, für die dort zudem eine Haltestelle ist, waren noch bemerkbar, jedenfalls wird ihr Einfluß durch die vielen Metallmassen im Institut begünstigt. Während ich die Institutsstörungen vermeiden konnte, wenn ich die Abend- und Nachtstunden zu Messungen benutzte, konnten die Straßenbahnstörungen nur durch Verringerung des Nadelabstandes unschädlich gemacht werden.

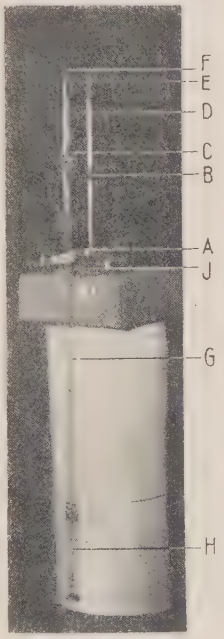
Für die neue Anordnung zog ich den 1 mm starken Aluminiumdraht auf 0,4 mm aus, ferner probierte ich ebenso dicken, blanken Kupferdraht. (Auf den von anderer Seite verwendeten Eisen- oder Stahldraht verzichtete ich wegen seiner Magnetisierbarkeit). Beide behandelte ich in der oben beschriebenen Weise, dabei erwies sich der Kupferdraht als geeigneter. Mit ihm fertigte ich ein etwa 120 cm langes Gehänge, dieses war auch störungsfreier, doch genügte mir seine Empfindlichkeit noch nicht.

Nun baute ich ein in allen Teilen wesentlich leichteres Gehänge. Für die Magnetchen wurde Uhrfederstahl vom Querschnitt 0,15 × 0,3 mm gewählt, gestreckt, gehärtet und in Stücke von 8,8 mm Länge gebrochen. Dann wurden von den ca. 100 Nadeln die besten ausgewählt, je acht parallel und in gleichen Abständen, mit Schellack auf ein Glimmerscheibchen aufgeklebt und je einen Tag zwischen die Pole zweier starker Stahlmagnete gelegt. Nach mehrwöchigem Lagern wurden die Magnetsysteme auf ihre Stärke untersucht und die zwei besten

1) K. R. v. Koch, Phys. Zeitschr. 12. p. 822. 1911.

ausgewählt, die sich bei geringer Verdrehung gegeneinander als astatisch erwiesen.

Als starre Verbindung der zwei Magnetsysteme probierte ich diesmal ein elastisch biegsames Material, das ein bequemeres Arbeiten als die weichen Metalldrähte zuließ, nämlich 0,2 bis 0,5 mm feine und 100—120 cm lange Glasstäbchen. Das schließlich benutzte ist 107 cm lang und 0,35 mm stark. Dieses Stäbchen klebte ich an ein schmales Aluminiumplättchen, an dieses das eine System, das als Hauptsystem dient, und brachte hier auch den Spiegel an, das Plättchen hängt mit einer feinen Zunge in dem Loch eines Aluminiumscheibchens, an das der am Torsionskopf hängende 17 cm lange Quarzfaden angeklebt ist. Dieses Scheibchen gestattet die bequeme Abnahme und Vergleichung der Gehänge unter Benutzung eines und desselben Aufhängefadens; es dient zugleich zur Arretierung, die durch eine vertikal bewegliche Messinggabel von geeigneter Form bewirkt wird.



Das störungsfreie Torsionsmagnetometer.

Fig. 2.

Das Gehänge befindet sich in einem Messinggehäuse, das Herr Sammlungsverwalter Klopfer meinen Wünschen entsprechend in der Institutswerkstatt herstellen ließ. Dabei wurde auf leichte Zerlegbarkeit Wert gelegt. Fig. 2 zeigt das Gehäuse mit einem Versuchsgehänge. Auf einer 120 cm hohen Steinsäule ist das schwere mit 3 Stellschrauben versehene Stativ *A* aufgestellt, dessen Arm *B* vertikal verschiebbar ist. Auf *B* ist das Gehäuse *C* aufgeschraubt, das zur Aufnahme des oberen Systems, des Spiegels, der Arretierung, des Dämpfers (Glimmerscheibe) und der Aufhängevorrichtung dient. Der mit einem Fenster versehene Gehäusemantel *J* ist der Einsicht wegen abgenommen. An dieses Gehäuse ist oben die Glasröhre *D* mittels einer Fassung angeschraubt, die den Torsionskopf *E* mit verstellbarem Stift *F* trägt, an dem der Aufhänge-

faden festgemacht ist. Nach unten ist die Glasröhre *G* angeschraubt, die das Glasstäbchen umschließt. An diese ist eine weitere Röhre *H* mit Bajonettverschluß angesetzt, die das untere System und eine zweite Glimmerscheibe als Dämpfer umschließt; ihre Länge beträgt mit Rücksicht auf die verschiedene Länge der Glasstäbchen 20 cm. Hier und am Gehäuse oben sind bei Aufnahme der Photographie noch nicht vorhandene Thermometer angebracht, welche die Temperaturdifferenz (nur 0,3 °) der Systeme, deren Abstand 105,4 cm beträgt, abzulesen gestatten.

Dieses System besitzt eine Schwingungsdauer von 10 Sekunden, sein Dämpfungsverhältnis ist 5,2, also das logarithmische Dekrement 0,72. Bei einem Skalenabstand von 2 m kommt das Instrument bei 500 mm Ausschlag nach etwa 35 Sekunden zur Ruhe. Durch Verwendung größerer, ev. auswechselbarer Dämpferflügel läßt sich diese Zeit und das Dämpfungsverhältnis auch nach Belieben noch günstiger wählen oder bequem variieren.

Damit ich nun den Einfluß der Straßenbahn allein feststellen konnte, ließ ich einen großen Schalltrichter bauen, der an einem in Hinblick auf das Straßenbahngeräusch günstig gelegenen Fenster angebracht wurde und in ein Mikrophon endet. Mittels eines Kopfhörtelephons konnte ich die Straßenbahn schon auf einige 100 m hören und mich davon überzeugen, daß bei geeigneter Verstellung der Magnetsysteme gegeneinander und einem Skalenabstand von etwa 2 m das Magnetometer von der Straßenbahn praktisch unabhängig ist. Auf die zahlreichen mechanischen und elektromagnetischen Störungen, die vom Institut herrühren, reagiert es aber noch, weshalb genaue Messungen nur abends und nachts vorgenommen werden können. Die Ruhelage des Nullpunkts des Instruments ist gut, ein ev. geringes Wandern im Laufe eines Abends kann leicht festgestellt und in Rechnung gezogen werden. Auf jeden Fall besitzt das Instrument die äußerste Grenze der Empfindlichkeit eines astatischen Torsionsmagnetometers, die im Stuttgarter Physikalischen Institut erreichbar ist. Es sei daher gestattet, noch einmal kurz im Zusammenhang die Konstruktion eines solchen Instrumentes anzugeben.

Zur Herstellung der Magnetsysteme verwendet man Uhr-

federstahl von sehr kleinem Querschnitt, richtet ihn gerade, härtet ihn, bricht gleich lange Stückchen von höchstens 1 cm Länge ab, klebt die besten gleichmäßig auf mehrere Glimmerplättchen, magnetisiert sie, läßt sie einige Wochen liegen und wählt dann 2 gleich starke aus. Man kann aber auch zuerst magnetisieren und anlassen, und zuletzt die Magnetchen aufkleben.[1]) Als starre Verbindung nimmt man bei langen Gehängen vielleicht dünnen Kupferdraht, bei kürzeren besser gerade Glasstäbchen. Das Gehänge sollte vom Quarzfaden leicht abnehmbar sein, damit bequemes Auswechseln möglich ist. Das völlig eisenfreie Gehäuse besteht aus einem Torsionskopf mit Glasröhre für den Quarzfaden, dann kommt ein Kasten mit Fenster, welcher Aufhängevorrichtung, Hauptsystem, Spiegel, Dämpfung und Arretierung enthält, und auf dem Arm eines verstellbaren Stativs sitzt; unten ist eine Glasröhre als Schutz für die Verbindungsstange angeschraubt, die durch eine abnehmbare kurze aber weitere Glasröhre mit Boden zur Aufnahme des Hilfssystems und des zweiten Dämpfers abgeschlossen ist.

3. Konstante des Magnetometers.

Die Theorie des störungsfreien Torsionsmagnetometers haben F. Kohlrausch und L. Holborn angegeben.[2]) Für den kleinen Ausschlag α, den ein ablenkendes Feld $\mathfrak{F}$ am Magnetometer hervorbringt, gilt die Formel

$$\mathfrak{F} = C \cdot \alpha .$$

Diese Konstante C des Magnetometers ist das Verhältnis der Direktionskraft des Aufhängefadens zum magnetischen Moment des Hauptsystems. Sie wird am besten empirisch bestimmt durch den Ausschlag, den ein bekanntes magnetisches Feld erzeugt. Dieses kann von einer stromdurchflossenen Spule hervorgerufen werden, deren magnetisches Moment

$$\mathfrak{M} = S \cdot i \quad CGS,$$

---

1) V. Strouhal und C. Barus, Wied. Ann. **20.** p. 662. 1883 und Elektrotechn. Zeitschr. **12.** p. 558. 1891. F. Paschen, Zeitschr. für Instrumentenkunde **13.** p. 14 1893. Wied. Ann. **48.** p. 281. 1893.

2) F. Kohlrausch und L. Holborn, Ann. d. Phys. **10.** p. 293 bis 299. 1903. Vgl. auch E. Gumlich, Magn. Messungen. 1918. p. 49—53.

also gleich dem Produkt aus Windungsfläche S und Stromstärke i ist. Unter Berücksichtigung der Dimensionen von Spule und Magnetsystem, sowie des Einflusses des Hilfssystems, erhält man für die Berechnung von C die Formel

$$(1) \quad C = \frac{2\,S\,i}{\alpha\,a^3}\left[1 + \frac{1}{a^2}\left(\frac{1}{2}L^2 - \frac{3}{4}l^2 - \frac{9\,(R_1^5 - R_0^5)}{10\,(R_1^3 - R_0^3)}\right) + \psi\left(\frac{a}{h}\right)\right],$$

wo α der absolut gemessene Ausschlag, a der Abstand der Spulenmitte von der Magnetmitte, L die Länge der Spule, l der Polabstand des Magnets, R_1 der äußere und R_0 der innere Halbmesser der Spule, h der Abstand der zwei Magnete, $\psi(a/h)$ der Einfluß des Hilfsmagnets ist.

Um eine genau bekannte Windungsfläche zu haben, wickelte ich auf eine unmagnetische Glasröhre von 1,91 cm Durchmesser eine 11,1 cm lange Spule auf. Dieselbe erhielt 8 Lagen von 0,5 mm starkem umsponnenem elektrolytischem Kupferdraht. Die Windungsfläche beträgt 6106 cm², der innere Radius ist 1,91 cm, der äußere 2,74 cm. Mit dieser Spule wurde die Konstante C gemessen.

Hierbei zeigte sich, daß dieselbe dann gleich groß blieb, wenn im Beobachtungszimmer und in den angrenzenden Räumen die magnetischen Verhältnisse gleich blieben. Diese Forderung war aber nur im Beobachtungszimmer erfüllbar, denn in den Nebenräumen wurden dringende kriegswissenschaftliche Arbeiten gemacht. Die dabei notwendigen öfteren Umräumungen dieser Zimmer beeinflußten das Instrument, so daß seine Konstante und sein Nullpunkt geringe Schwankungen aufwiesen. Natürlich wurden mir größere Umräumungen mitgeteilt, welche ich übrigens auch an der Lage des Nullpunkts feststellen konnte, ich mußte dann die Konstante neu bestimmen, um weitere genaue Messungen vornehmen zu können.

Zur Neubestimmung werden gewöhnlich 12 Ablesungen bei 3 verschiedenen Stromstärken gemacht, die Spule befindet sich dabei in denselben ostwestlichen Abständen, wie der gerade zu untersuchende Körper. Ihre Achse wird mittels einer Zielvorrichtung genau auf die Mitte des Magnetsystems gerichtet. Die Stromstärke wird an einem Präzisions-Milli-Volt und -Amperemeter von Siemens & Halske mit Nebenschluß bis 1,5 Ampere abgelesen, das ich mit Hilfe eines Standard-

instrumentes von Hartmann & Braun neu geeicht habe. So ergaben die Messungen der Konstante z. B. am 13. Februar 1918 zu 0,03978, am 4. März zu 0,03958, am 16. April zu 0,04025, am 13. Mai zu 0,03992. Für die letzte Stelle kann nicht garantiert werden, da hierzu die Meßgenauigkeit nicht ausreicht, die Konstantenbestimmungen sind bis auf 0,2 Proz. als richtig anzusehen. Daß die Änderungen so klein sind, mag nicht zuletzt seinen Grund in dem nur 105,4 cm betragenden Abstand der zwei Magnetsysteme haben. Die Temperatur des Beobachtungszimmers bleibt während der einzelnen Messung fast konstant, die 5,2 m betragende Höhe des Zimmers hat jedenfalls hierauf einen guten Einfluß, ferner wird der Heizkörper stets stundenlang vorher abgestellt. So hat die Genauigkeit unter Temperatureinflüssen wenig zu leiden. Daß nebenbei unter günstigen magnetischen Verhältnissen auch die zeitliche Konstanz des Instruments eine gute ist, geht aus den um den Mittelwert 0,03986 schwankenden Konstantenangaben von 5 Monaten hervor.

Es sei nun gestattet, die vier bis jetzt bekannten astatischen Torsionsmagnetometer ähnlicher Bauart miteinander zu vergleichen, dabei sei I das nicht transportable, II das transportable der Reichsanstalt, III das fest aufgestellte des Marburger Instituts, IV das transportable des hiesigen Instituts.

Tabelle 1.

Vergleich der störungsfreien Torsionsmagnetometer.

Instrument	Konstante	Dämpfungsverhältnis	Ruhelage nach max. Ablenkg. in Sek.	Magnet-		Aufhängung		Magnetabstand
				länge	querschnitt	Material	Länge	
I	0,292	9	20	6	0,385	Platiniridium	135	192,3
II	0,190	—	—	6	0,385	Platiniridium	52	126,0
III	0,265	3,3	45—60	5,5	0,385	Platiniridium	—	187,6
IV	0,040	5,2	35	0,88	0,0036	Quarz	17	105,4

Die Längen und Querschnitte sind hierbei in cm bzw. cm^2 angegeben.

Als einziger Nachteil meines Instruments kommt also der etwas geringe Abstand der Magnetsysteme in Betracht, der aber nicht von der Bauart desselben, sondern von den Institutsverhältnissen herrührt. Doch läßt sich dadurch Abhilfe schaffen,

daß man den ablenkenden Körper kleiner wählt und damit seinen Abstand verringern kann. So eignet sich infolge der kleinen Magnetchen und der großen Empfindlichkeit das Instrument auch hervorragend zur Untersuchung von solchen Legierungen, die in größeren Stücken schwer herstellbar sind, oder nur geringe Magnetisierbarkeit besitzen; ebenso wird es bei Messungen der Anfangssuszeptibilität, oder zur Feststellung von kleinen magnetischen Intensitätsänderungen vorzügliche Dienste leisten.

Infolge des sehr geringen Gewichts des Gehänges, das bei der jetzigen Anordnung nur 0,4 g beträgt, läßt sich ferner bei entsprechend feinem Quarzfaden als Aufhängung und bei geeigneter Wahl des Abstandes der Magnetsysteme die Empfindlichkeit so steigern, wie es die magnetischen Verhältnisse am Versuchsort eben gestatten. Insbesondere verdient noch Erwähnung, daß dieses Instrument auch das gewöhnliche Magnetometer an Empfindlichkeit weit übertrifft, ohne dabei auf Störungen zu reagieren, die das letztere längst unbrauchbar machen und daher die Verwendung eines beliebig empfindlichen Gumlichschen Magnetometers[1]) gänzlich ausschließen.

Faßt man die Vorteile des neuen Instruments zusammen, so ergeben sich

1. weitgehende Störungsfreiheit,
2. kleine und starke Magnetsysteme,
3. günstig wählbare Luftdämpfung,
4. Transportfähigkeit und bequeme Aufstellung,
5. einfache mechanische Konstruktion,
6. geringe Herstellungskosten,
7. höchste Empfindlichkeit,
8. größter Verwendungsbereich.

4. Hilfsapparatur.

Die 2 je 130 cm langen Magnetometerschienen sind ostwestlich orientiert, da bei der Ablenkung aus der ersten Gaußschen Hauptlage der Ausschlag doppelt so groß ist, wie aus der zweiten. Die Schienen sind ganz aus Holz gefertigt, ihre

1) E. Gumlich, Verh. d. D. Phys. Ges. **16.** p. 406. 1914 und Magnet. Messungen. 1918. p. 44—47.

Stützen sind am Fußboden mit Messingschrauben festgemacht, zwischen beiden ist das Magnetometer auf einer Steinsäule aufgestellt, sie selbst sind durch seitliche Rahmenschenkel miteinander verbunden. Auf den Schienen laufen zwei je 60 cm lange Schlitten, die zur Aufnahme der Spulen dienen und mittels Zug- und Druckschrauben in der Vertikalen und Horizontalen verstellt werden können. Einen Maßstab brachte ich nicht an, da sich die Schienen unter Umständen etwas verziehen könnten, zur Messung der Abstände ließ ich in der Maßstabfabrik von J. Rumold in Zuffenhausen einen hierfür geeigneten Holzmaßstab aus bestem Material anfertigen, mit ihm maß ich auch die Entfernung vom Spiegel bis zu der fest aufgestellten Skala.

Die Magnetisierungsspulen stellte ich mit großer Sorgfalt aus eisenfreiem Material her. Auf 62 cm lange unmagnetische Glasröhren wickelte ich je sechs Lagen mit Seide umsponnenen Kupferdrahtes von 0,3 mm Stärke. Die Hauptspule besitzt 9035 Windungen und liefert ein maximales Feld von 100 Gauß, ohne daß sie überansprucht wird. Die Länge L der Wickelung beträgt 55,03 cm, es kommen also auf 1 cm 164,18 Windungen. Der mittlere Windungsradius r ist 0,633 cm. Die Endscheiben sind aus trockenem Hartholz gefertigt. Damit der elektrische Widerstand und das Potentialgefälle innerhalb der Spule nicht zu groß wurden, wickelte ich die Lagen jede für sich allein auf und verlötete nachher je drei Zuführungsdrähte so miteinander, daß drei Lagen stets parallel geschaltet sind. Nun ergab sich der Widerstand zu 8,6 Ohm. Natürlich zeigt jetzt das Amperemeter stets das dreifache des durch die einzelne Windung gehenden Stromes an, was bei der Berechnung der Spulenkonstante zu berücksichtigen ist. Bedenkt man ferner, daß die Stromstärke i in Ampere statt im CGS-System abgelesen wird, so herrscht in der Mitte dieser Spule das Feld

$$\mathfrak{H}_m = \frac{2\pi n i}{3 \cdot 10} \cdot \frac{L}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}} = \frac{2\pi n i}{3 \cdot 10} \cdot 1{,}9995\ CGS.$$

Weil aber das Feld in einer endlichen Spule nicht ganz homogen ist, so muß diese Inhomogenität für die Länge des zu untersuchenden Körpers berechnet werden. Für einen

Punkt der Achse, der um b cm von der Mitte der Spule entfernt ist, wird die Feldstärke

$$\mathfrak{H}_b = \frac{2\pi n i}{3 \cdot 10}\left[\frac{\frac{L}{2} - b}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{L}{2} - b\right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + b}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{L}{2} + b\right)^2}}\right].$$

Wenn die Messungen an Proben in Gestalt von Ellipsoiden mit 11 cm langer Hauptachse vorgenommen werden, so ergibt sich an deren Endpunkten das Feld

$$\mathfrak{H}_{11} = \frac{2\pi n i}{3 \cdot 10} \cdot 1{,}9991\ CGS.$$

Die Inhomogenität beträgt somit

$$\frac{2\pi n i}{3 \cdot 10} \cdot 0{,}0004 \quad \text{oder} \quad 0{,}02 \text{ Proz.}$$

Der Massenverteilung des Ellipsoids entsprechend, berechnete ich als mittlere äußere Feldstärke

(2) $$\mathfrak{H}_a = \frac{2\pi n i}{3 \cdot 10} \cdot 1{,}9994 = 68{,}75 \cdot i\,CGS.$$

Der Spulenfaktor ist also 68,75. Wird er mit der abgelesenen Amperezahl multipliziert, so gibt er sofort das Spulenfeld in absolutem Maß an.

Diese und die analoge Hilfsspule liegen in den Holzlagern der Schlitten der Magnetometerbank, ihre Achsenrichtungen sind mittels Zielvorrichtungen genau bestimmbar und können durch die Schrauben der Schlitten verstellt werden. Die Felder der Spulen kompensieren sich sehr gut, eine eventuelle Differenz bleibt stets unter 1 Skalenteil diese Korrektion wird für sich bestimmt und in Rechnung gezogen. Eine Kompensation auf andere Weise als mit einer einzigen, gleichgebauten Hilfsspule herzustellen, ist nicht möglich, weil nur in diesem Falle auch die Wirkungen der Spulen auf das Hilfssystem sich aufheben.

Die Ablesung der Ausschläge erfolgt mit Spiegel und Fernrohr an einer in Millimeter geteilten 1 m langen Milchglasskala von Hartmann & Braun. Skala und Fernrohr stehen auf einer Steinsäule in 213,26 cm Abstand vom Spiegel und gestatten die Ablesung von Zehntelmillimetern. Bei Messung

der Abstände werden natürlich die notwendigen Korrektionen angebracht.[1])

5. Berechnungsformeln.

Die Charakterisierung ferromagnetischen Materials geschieht am besten durch Aufnahme seiner jungfräulichen Kurve und der Hysteresisschleife. Seit einigen Jahren wird aber die Bezeichnung „Jungfräuliche Kurve" verdrängt[2]) durch „Nullkurve" für die einseitige stufenweise Magnetisierung, und durch „Kommutierungskurve" für Stromumkehr bei jedem Feldwert, diese Unterscheidung ist aus experimentellen Gründen sehr am Platze. Für manche Zwecke wird die Magnetisierung $\mathfrak{J}$ bestimmt, also das magnetische Moment der Volumeneinheit, die mittels der Suszeptibilität x als Funktion der herrschenden Feldstärke $\mathfrak{H}$ definiert wird. Für die bei Eisen und Stahl besonders wichtigen kleinen und mittleren Feldstärken ist es aber besser, die Induktion $\mathfrak{B}$ der Volumeneinheit mit Hilfe der Permeabilität μ als Funktion der Feldstärke $\mathfrak{H}$ zu bestimmen. Man hat also

$$\mathfrak{J} = x\mathfrak{H}, \qquad \mathfrak{B} = \mu\mathfrak{H}. \tag{3}$$

Zwischen diesen Größen bestehen bekanntlich die Beziehungen

$$\mu = 1 + 4\pi x, \qquad \mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}. \tag{4}$$

Bei der graphischen Darstellung verläuft die Kurve für $\mathfrak{J}$ zuletzt horizontal, während die Kurve für $\mathfrak{B}$ schließlich geradlinig ansteigt. Die Magnetisierungskurve gestattet ferner durch Ausmessen die Angabe des Hysteresisverlustes. Außerdem ist es zweckmäßig, μ als Funktion von $\mathfrak{B}$ aufzuzeichnen, welche Kurve zugleich x und $\mathfrak{J}$ darstellt.

Während die Nullkurven und damit auch die Permeabilitätskurven durch sukzessive Steigerung der Feldstärke erhalten werden, gibt es für die Aufnahme der Hysteresisschleife verschiedene Möglichkeiten, von welchen ihre genaue Form abhängt, worauf später noch näher eingegangen werden wird.

---

1) F. Kohlrausch, Lehrb. d. prakt. Physik, Abschnitt 25.

2) L. Graetz, Handb. d. Elektr. u. d. Magnet. IV. 2. 1915. p. 311. W. Jaeger, Elektr. Meßtechnik 1917. p. 57. E. Gumlich, Magnet. Messungen. 1918. p. 10.

Ich benutze den bei magnetometrischen Messungen üblichen Weg der stufenweisen Verstärkung und Schwächung des Feldes.

Das störungsfreie Torsionsmagnetometer gestattet die direkte Messung der Magnetisierung $\mathfrak{J}$. Gibt man den Ausschlag α der Magnetnadel durch die Skalenteile e und den Skalenabstand A an, so erhält man für die Intensität der Magnetisierung eines Körpers vom Volumen v die Formel

$$\mathfrak{J} = \frac{e\,C\,a^3}{4\,A\,v\left[1 + \frac{\frac{1}{2}L^2 - \frac{3}{4}l^2}{a^2} + \psi\left(\frac{a}{b}\right)\right]}, \tag{5}$$

wobei diesmal L der Polabstand des Versuchskörpers ist und für Ellipsoide mit den Achsen a und b sich zu $\sqrt{\frac{3}{5}(a^2 - b^2)}$ ergibt und C aus Gleichung (1) erhalten wird.

Die Magnetisierung des Versuchskörpers erzeugt aber bei allen Körperformen mit Ausnahme des Ringes ein dieser entgegengesetzt wirkendes Feld, das ihr proportional ist. Dieser Proportionalitätsfaktor N ist nach F. Neumann[1]) für Rotationsellipsoide mit dem Dimensionsverhältnis m (große : kleine Achse)

$$N = \frac{4\pi}{m^2 - 1}\left[\frac{m}{\sqrt{m^2 - 1}}\,\log\text{nat}\left(m + \sqrt{m^2 - 1}\right) - 1\right]. \tag{6}$$

Nach dieser Formel berechnet man den Entmagnetisierungsfaktor N von Ellipsoiden. Nur sie gestatten die genaue Bestimmung des wirkenden Feldes

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}_a - N\mathfrak{J}, \tag{7}$$

wobei sich bekanntlich die langgestreckten am besten zu Messungen eignen, da mit wachsendem m der Faktor N sehr schnell abnimmt, während die mit Vorliebe untersuchten zylindrischen Stäbe Schwierigkeiten bei der genauen Bestimmung von N und $\mathfrak{B}$ ergeben, worüber Ch. R. Mann, C. Benedicks, C. L. B. Shuddemagen, O. Grotrian u. a. eingehende experimentelle Untersuchungen angestellt haben.[2])

6. Herstellung der Versuchsellipsoide.

Die Herstellung guter Rotationsellipsoide ist eine mühsame Arbeit, doch zog ich es wegen der oben angegebenen Vorteile vor, meine Messungen an Ellipsoiden auszuführen.

1) F. Neumann, Vorles. über Theor. d. Magnet. 1881. p. 74.

2) Näheres z. B. bei L. Graetz, Handb. d. Elektr. u. d. Magnet. IV. 2. A. 1915.

Ausgangspunkt für die Herstellung derselben ist eine möglichst genau gezeichnete Ellipse. Ich wandte mich deshalb an verschiedene erstklassige Instrumentenfabriken, um mir auf mechanischem Wege hergestellte Ellipsen vom Dimensionsverhältnis 50 bis 60 zu verschaffen, doch ohne Erfolg. Nun berechnete ich die Punkte einer Ellipse von 132 cm Länge und 2,4 cm größter Breite in Abständen von 1 cm, die in einem auf eine Glasplatte aufgeleimten Zeichenbogen eingetragen wurden. Die Hauptscheitel der Ellipse zeichnete ich in zehntacher Vergrößerung auf besondere Blätter. Diese ließ ich in der graphischen Kunstanstalt von Haufler & Wiest, Stuttgart, auf die entsprechende Größe ($^1/_{10}$) photographieren und mittels einiger Kontrollpunkte an die Ellipsenzeichnung ankleben. Nun wurde sie auf 22 cm verkleinert, auf Zinkblech photographiert. Die so erhaltene Kurve kann als vollkommen angesehen werden. In der Institutswerkstatt wurde eine Schablone angefertigt, nach der jetzt Rotationsellipsoide von den Achsen 22 auf 0,4 cm, also vom Dimensionsverhältnis 55, aus beliebigem Material auf der Drehbank hergestellt werden können. Trotzdem diese Arbeit von Lehrlingen besorgt werden mußte, zeigen die berechneten und die nach dem archimedischen Prinzip bestimmten Volumina der Ellipsoide durchschnittlich nur ca. 1 Proz. Abweichung. Die gewählten Abmessungen zeigten sich später als ein wenig zu groß, weil die Abstände vom Magnetometer bei hohen Induktionen etwas ungünstig wurden.

Da nach Gleichung (7) eine genaue Kenntnis von $\mathfrak{H}$ eine solche von N voraussetzt, so bestimmte ich die Dimensionen meiner Ellipsoide möglichst genau, und natürlich nach jeder Wärmebehandlung derselben wieder von neuem. Die Länge maß ich mittels eines großen Kalibermaßstabes der Hommelwerke auf 5 Stellen, den mittleren größten Durchmesser mittels einer Mikrometerschraube derselben Firma auf 4 Stellen, so daß also m auf 4 Stellen genau wird. Dann berechnete ich für mehrere Dimensionsverhältnisse zwischen 54,50 und 55,50 die genauen Entmagnetisierungsfaktoren nach Formel (6) und stellte sie als Funktion von m graphisch dar, so daß ich nun die Werte derselben für jedes m des Intervalls daraus entnehmen konnte. Bei den Messungen werde ich später

immer gleich den Wert von N anstatt der Dimensionswerte angeben.

Das Volumen und das spezifische Gewicht der Ellipsoide bestimmte ich stets durch eine genaue Wägung in Luft und Wasser.

7. Entmagnetisierung.

Um ferromagnetisches Material von jeder Vorgeschichte zu befreien, muß dasselbe dem Einfluß eines langsam abnehmenden Wechselfeldes unterworfen werden, dessen Anfangswert über dem Höchstwert früherer magnetisierender Felder liegen muß. Daß das Wechselfeld aber auch möglichst schwach werden soll, haben E. Gumlich und W. Rogowski angegeben und zur Erreichung dieses Zweckes einen besonderen Entmagnetisierungsapparat gebaut.[1]) Auch Ch. W. Burrows[2]) hat sich eingehend mit der Frage der Entmagnetisierung beschäftigt, seine Ergebnisse stehen aber zum Teil in direktem Widerspruch mit denen der anderen Forscher. Der in manchen Büchern gemachte Vorschlag des Ausglühens der Proben ist auch ohne die Untersuchung von J. G. Gray und A. D. Ross[3]) vom Standpunkt des Metallographen aus absolut zu verwerfen, da sich bekanntlich durch diesen Prozeß die physikalischen Eigenschaften in erheblichem Maße zu ändern pflegen und zudem sachgemäßes Ausglühen besondere Apparatur und große Erfahrung benötigt. Eine magnetische Untersuchung des Materials ist hierbei auf jeden Fall unmöglich, da nach jeder einzelnen Messung ausgeglüht werden müßte, wodurch dieselbe Messung nicht mehr am selben genau gleichen Material wiederholt werden könnte, was sich bei gehärteten Stählen am schlimmsten bemerkbar machen würde. So ist es eigentlich merkwürdig, daß sich diese Ansicht bis jetzt erhalten hat.[4]) Gegen die Methode des abnehmenden Wechselfeldes sind Bedenken wegen ev. Wiedermagnetisierung laut geworden. Ob diese vereinzelten Beobachtungen wirklich hierin ihre Erklärung finden können, kann nur an einem magnetisch sehr günstig

1) E. Gumlich u. W. Rogowski, Ann. d. Phys. **34.** p. 236 b 246. 1911.

2) Ch. W. Burrows, Bull. Bur. of Standards. **4.** p. 205—274. 1908.

3) J. G. Gray u. A. D. Ross, Ann. d. Phys. **33.** p. 1418—1426. 1910.

4) L. Graetz, Handb. d. Elektr. und d. Magnet. IV. 2. p. 339. 1915.

gelegenen Orte einwandfrei geprüft werden, anzunehmen ist dies aber kaum. Bei der Verwendung einer Wechselstrommaschine läßt man dieselbe gewöhnlich langsam auslaufen. Dabei treten aber zuletzt gerne Stromstöße auf, die remanenten Magnetismus verursachen, der nicht ohne weiteres vermeidbar ist.[1])

Ich probierte nun folgende Anordnung aus: Da als maximales magnetisierendes Feld meiner Spulen etwa 100 Gauß in Betracht kommen, so entnahm ich der Wechselstrommaschine des Instituts von 50 Perioden pro Sekunde eine Spannung von 65 Volt, erzeugte damit ein Feld von 150 Gauß, verringerte es durch Schwächung des Erregerstromes auf etwa 50 Gauß und drückte nun den Wechselstrom durch aufeinanderfolgende Einschaltung von 4 selbstgebauten Flüssigkeitswiderständen langsam und gleichmäßig auf Null herab. Die Glasröhren der Widerstände haben zunehmende Länge und abnehmenden Querschnitt, die Konzentration nimmt auch ab, die Widerstände betragen zusammen über 300000 Ohm. Die Abnahme des Stromes konnte ich mittels dreier Hitzdrahtamperemeter von Hartmann & Braun mit den Meßbereichen 0—3; 0—0,3 und 0—0,04 Ampere verfolgen. Mit dieser Anordnung kann stets volle Entmagnetisierung erreicht werden, da das schädliche Auslaufen der Maschine hierbei umgangen ist. Dabei ist es möglich, durch die zahlreichen Leitungsanlagen des Instituts alle Ströme mit Ausnahme des Ein- und Ausschaltens der Wechselstrommaschine im Beobachtungszimmer selbst zu regulieren.

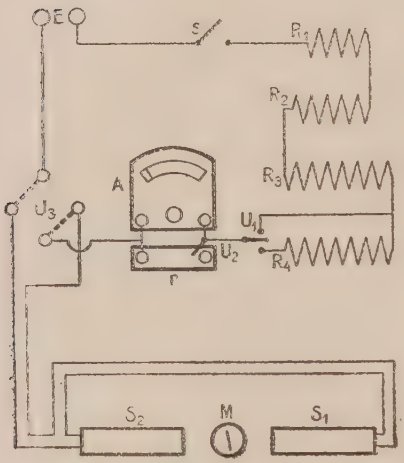
8. Versuchsanordnung.

Da infolge der Materialbeschlagnahmung nur im äußersten Notfall an Neuanschaffungen gedacht werden konnte, so stellte ich mit den vorhandenen Instrumenten solange Versuche an, bis es mir gelang, mit wenig Apparaten ohne schädigende Beschränkungen auszukommen.

Fig. 3 zeigt das Schaltungsschema für den Magnetisierungsstromkreis, Fig. 4 für den Wechselstrom- und Erregerstromkreis. In Fig. 3 sind E die Klemmen einer Stromquelle von

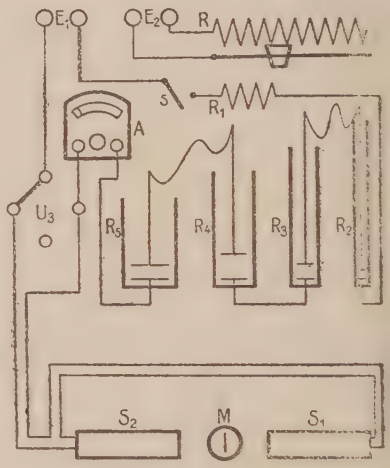
1) K. Stoye, Inaug.-Diss., Halle 1913. p. 11.

32 Volt, s ein Schalter, R_1 bis R_4 Regulierwiderstände von 40, 85, 450 und 500 Ohm, wovon der letzte mittels Umschalter U_1 nur für die geringsten Felder mitbenutzt wird, A ist ein Präzisions-Millivolt- und Amperemeter für Gleichstrom von 0—150 Milliampere von Siemens & Halske, das ich mit einem Standard-Amperemeter von Hartmann & Braun neu geeicht habe, r ist ein Nebenschluß bis 1,5 Ampere, Umschalter U_2 gestattet die bequeme Ein- und Ausschaltung desselben, zum Kommutieren der Stromrichtung machte ich mir einen Viernapf-Kommutator U_3, von dort aus geht der Strom



Schema des Magnetisierungsstromkreises.

Fig. 3.



Schema des Entmagnetisierungsstromkreises.

Fig. 4.

durch die Magnetisierungsspulen S_1 und S_2, zwischen denen sich das Magnetometer M befindet, und über U_3 zurück zur Stromquelle. Die Leitungsdrähte für die Spule zur Konstantenbestimmung des Magnetometers können bei U_3 angeschlossen werden.

In Fig. 4 sind E_1 die Klemmen zur Abnahme des Wechselstroms, s wieder der Schalter, R_1 ein Widerstand um die maximale Stromstärke zu regulieren, R_2 bis R_5 Flüssigkeitswiderstände verschiedener Abmessungen und Konzentrationen, A ein Hitzdrahtamperemeter von 0—3 Ampere von Hart-

mann & Braun, S_1 und S_2 sind wieder die Spulen und U_3 der diesmal in der gezeichneten Weise verwendete Viernapf. E_2 stellen die Klemmen für den Erregerstrom dar, der durch den Schieberwiderstand R von 450 Ohm auf den dritten Teil seines Wertes geschwächt werden kann.

II. Magnetische Messungen an Eisen-Vanadium-Legierungen.

9. Material.

Das hochempfindliche Magnetometer hatte ich zu einer Untersuchung über die Anfangssuszeptibilität bestimmt, da es mir aber absolut nicht gelang, das betreffende Material in der Kriegszeit zu beschaffen, so muß diese Arbeit vorerst verschoben werden. Da ich bei der Durchsicht der Literatur auch die Arbeit von J. J. Lonsdale über die magnetischen Eigenschaften von Vanadiumstahl[1]) gelesen hatte und mir die dort veröffentlichten Resultate äußerst zweifelhaft erschienen waren, so hielt ich es für sehr zweckmäßig, den Einfluß geringer Zusätze von Vanadium auf die Magnetisierbarkeit des Eisens einer gründlichen Untersuchung zu unterziehen, um so mehr, als dies bis jetzt noch nicht geschehen ist.

Für technische Zwecke ist der 1900 von Arnold eingeführte Vanadiumstahl schon mehrfach untersucht worden, doch auch wissenschaftlich bietet er Interesse, und zwar eben in magnetischer Hinsicht, weil Vanadium infolge seines Atomgewichts 51,2 der vierten Reihe des Periodischen Systems der Elemente angehört, also derselben Reihe wie Titan, Chrom, Mangan, Eisen, Kobalt und Nickel. Außer der obigen Untersuchung sind noch die Arbeiten von Stefan Meyer[2]), K. Honda[3]), P. Weiß und H. Kamerlingh-Onnes[4]), E. Wedekind und C. Horst[5]) zu erwähnen. K. Honda untersuchte Eisen-Vanadiumlegierungen mit jeweils um 10 Proz. steigendem Vanadiumgehalt und findet von zirka 31,5 Proz. V an, wo die Schmelzkurve ein Minimum hat, ein fast völliges Verschwinden

1) J. J. Lonsdale, Phys. Zeitschr. **14**. p. 581. 1913.

2) St. Meyer, Ann. d. Phys. **68**. p. 325. 1899; Wien. Ber. **108**. p. 171. 1899.

3) K. Honda, Ann. d. Phys. **32**. p. 1010 und 1036—1063. 1910.

4) P. Weiß u. H. Kamerlingh-Onnes, C. R. **150**. p. 687. 1910.

5) E. Wedekind u. C. Horst, Ber. d. D. Chem. Ges. **45**. p. 262. 1912.

der ferromagnetischen Eigenschaften. Weiter bewirkt V eine Vergrößerung des Umwandlungsintervalls. Das reine Element hat nach St. Meyer und K. Honda eine spezifische Suszeptibilität von $+ 1{,}5 \cdot 10^{-6}$, sie ist etwas kleiner als die von Ti, Cr und Mn, E. Wedekind und C. Horst stellten die Suszeptibilität der Oxyde und Sulfide fest, für VO fanden sie die sehr hohe Zahl $+ 50{,}06 \cdot 10^{-6}$, welches Material auch *Remanenz* gezeigt haben soll, als seine Magnetonenzahl wurde 14 berechnet. P. Weiß und H. Kamerlingh-Onnes fanden bei V das Curiesche Gesetz für den Paramagnetismus bei der Temperatur des flüssigen Wasserstoffs nicht bestätigt, denn die Magnetisierbarkeit wurde wesentlich kleiner gefunden als nach der Theorie zu erwarten gewesen wäre.

Es ist also von Interesse, zu wissen, wie ein geringer Zusatz von Vanadium auf die ferromagnetischen Eigenschaften des Eisens einwirkt, nachdem die verwandten Elemente in dieser Hinsicht schon oft und gründlich untersucht wurden bzw. noch werden. Diese Lücke suchte J. J. Lonsdale durch die Untersuchung eines Stahlringes mit 3,5 Proz. V, 0,6 Proz. C und 0,2 Proz. Mn auszufüllen. Es ist natürlich ohne weiteres klar, daß der Einfluß des V durch die Untersuchung dieser einen Legierung nicht klar gestellt werden kann, insbesondere wenn noch ein so beträchtlicher C-Gehalt vorhanden ist. Und nun die sehr merkwürdigen Versuchsergebnisse, auf die nachher genauer eingegangen werden soll, dem Vanadiumgehalt allein zuzuschreiben, dünkt mir doch eine gewisse Überschätzung des Wertes dieser ganzen Messung. Hier konnte nur eine Untersuchung mehrerer Legierungen mit verschiedenem V-Gehalt, aber sonst möglichst gleicher Zusammensetzung zum Ziel führen. Ich wandte mich deshalb an mehrere große Eisengießereien und erhielt trotz einiger Absagen (aus Kriegsgründen) auch etliche Versuchsstäbe, die aber bei der Untersuchung im Chemischen Laboratorium von Dr. Hundeshagen und Dr. Philip in Stuttgart keinen V-Gehalt ergaben. Nur die Versuchsanstalt der Friedr. Krupp A.-G. stellte mir 3 Legierungen mit verschiedenem V-Gehalt zur Verfügung, auch übernahm sie später kostenlos die von mir gewünschte Wärmebehandlung derselben, für beides möchte ich ihr auch hier meinen herzlichen Dank zum Ausdruck bringen. Nach der Angabe der

Versuchsanstalt haben die drei Legierungen folgende Zusammensetzung:

Tabelle 2.

Chemische Zusammensetzung der Vanadium-Legierungen.

V	C	Mn	Si	Gewählte Bezeichnung
0,64	0,22	0,23	0,07	I
1,75	0,28	0,29	0,08	II
3,60	0,36	0,20	0,20	III

Zur Abkürzung seien sie dem zunehmendem V-Gehalt entsprechend mit I, II und III bezeichnet. Hierbei möge erwähnt sein, daß praktische Verwendung nur Stähle mit höchstens 1 Proz. V finden, je nach dem Verwendungszweck enthalten sie Si, C, Mn, Ni, Cr, W, Mo. Das Vanadium wirkt nach den Angaben von G. Mars[1]) infolge seiner großen Verwandtschaft zum Sauerstoff und zum Kohlenstoff vorzüglich desoxydierend und entgasend, in größeren Mengen anwesend, bemächtigt es sich des vorhandenen Kohlenstoffs und bildet mehrere unveränderliche Vanadium-Karbide, die gewissermaßen Schlacken darstellen, es verhindert also dann eine Härtung. Andererseits ist das Material immer sehr dicht, so daß der magnetisch wirksame Eisenquerschnitt groß ist. Auf die Schädlichkeit der im Eisen vorhandenen Gase hat E. Gumlich[2]) im Jahre 1909 erstmals aufmerksam gemacht und inzwischen durch direkte Versuche bestätigt[3]), dasselbe fanden auch andere Forscher.[4])

Die Legierungen waren in der Fabrik bei 850° zwei Stunden geglüht worden und sind langsam erkaltet. Sie wurden in der Institutswerkstatt zu Rotationsellipsoiden von $22 \times 0{,}4$ cm Achsenlänge abgedreht und nach einigem Lagern erstmals in diesem Zustand untersucht, er möge mit *A* bezeichnet sein; daraufhin wurden sie nochmals ausgeglüht, um von den von der Kaltbearbeitung herrührenden mechanischen Spannungen

1) G. Mars, Die Spezialstähle. p. 310—317. 1912.

2) E. Gumlich, Elektrotechn. Zeitschr. 30. p. 1100. 1909.

3) Wiss. Abh. der Phys.-Techn. Reichsanstalt. 4. Heft 3. p. 316. 1918.

4) So wies B. Strauß (Stahl und Eisen. 34. p. 1814. 1914) nach, daß Stickstoff die Magnetisierbarkeit stark verschlechtert.

befreit zu werden, dies sei Zustand *B*; dann wurden sie gehärtet (*C*) und zuletzt wieder ausgeglüht (*D*), um zu entscheiden, inwieweit sich die Härtung rückgängig machen läßt. Die Wärmebehandlung entspricht also der üblichen, wie sie insbesondere auch von J. J. Lonsdale angewandt wurde.

Da es für Untersuchungen an Eisen und Stahl stets von Wichtigkeit ist, auch über das Kleingefüge orientiert zu sein, so ließ ich nach Rücksprache mit den Herren Professoren Staatsrat Dr. ing. C. v. Bach und R. Baumann von Stäben gleichen Materials und jeweils gleicher Wärmebehandlung in der Materialprüfungsanstalt der Technischen Hochschule Stuttgart Mikrophotogramme aufnehmen, der Schnitt ist dabei senkrecht zur Stabachse geführt. Auf die einzelnen Gefügebilder wird bei den Messungen eingegangen werden.

10. Stufenversuche.

Die Größe der Induktion für eine bestimmte Feldstärke hängt bei sonst gleichbleibenden Verhältnissen bekanntlich auch noch von der Zahl der Stufen bis zu dieser Feldstärke ab. Während von den verschiedenen Autoren bei diesbezüglichen Versuchen die Feldstärke in gesetzmäßiger Weise geändert zu werden pflegt, sind mir keine Untersuchungen bekannt, wo dies für die Induktion oder die Permeabilität geschieht. Dies mag nicht zuletzt darin seinen Grund haben, daß $\mathfrak{B}$ eben die Wirkung der Ursache $\mathfrak{H}$ ist und μ von $\mathfrak{H}$ abhängt. Ferner werden $\mathfrak{B}$ und μ in beschränktem Umfang noch von der Stufenzahl[1]) beeinflußt, während $\mathfrak{H}$ hiervon unberührt bleibt. Man muß also die Hysteresisschleife und Nullkurve eines Materials für die betreffende Stufenzahl schon kennen, um hieraus die zu gesetzmäßig geänderten $\mathfrak{B}$- bzw. μ-Werten gehörigen Feldstärken ersehen zu können, mit welchen dann neue Kurven aufzunehmen wären, bei denen die molekularen magnetischen Erschütterungen des Materials die Grundlage der Stufenfolge bilden würden. Die eventuellen Differenzen, die sich aus den Kurven ergeben, wären dann der Beweis dafür, daß die In-

1) Auf die hierüber veröffentlichten Arbeiten wird nachher eingegangen werden.

duktion nicht allein abhängt von der Stufenzahl, sondern auch von der Stufenwahl. Ist dies aber der Fall, so würde es nicht mehr genügen, zur exakten Vergleichung magnetischen Materials die Stufenzahl bei allen Versuchen gleichgroß zu nehmen, sondern man müßte auch die Stufenwahl gleich gestalten, was stets eine vorläufige Aufnahme der Kurven nötig machen würde. Was die Stufenwahl anbelangt, so wären die einfachsten Fälle die mit gleichen $\mathfrak{B}$- bzw. μ-Stufen. Untersucht man ferner dasselbe Material für verschieden großes $\mathfrak{B}_{max}$, so kann man erstens die Stufenzahl konstant lassen, also die Stufengröße variieren, und zweitens die Stufengröße konstant lassen und die Stufenzahl variieren. Dabei möchte ich noch daran erinnern, daß die Permeabilität die dem Material eigentümliche Größe ist, also auch die Grundlage für die Stufenwahl abgeben sollte.

Obwohl ich meinen Messungen nicht die Untersuchung dieser Verhältnisse als Ziel gesteckt hatte, wollte ich doch über die Größe der möglichen Differenzen bei verschiedener Stufenwahl orientiert sein. Da ich den Verlauf der einzelnen Kurven stets mit derselben Stufenzahl feststellen wollte, so konnte ich mich auf die Variation der Stufengröße beschränken. Da ferner μ nur aus der Nullkurve berechnet wird, so untersuchte ich auch nur diese.

Als Material für diese Untersuchung wählte ich gewöhnliches Flußeisen. Die chemische Analyse ergab 0,1 Proz. C, 0,08 Proz. Si, 0,7 Proz. Mn, 0,15 Proz. P. Aus einem 0,4 cm dicken Stab wurde ein Ellipsoid mit dem Entmagnetisierungsfaktor 0,015151 hergestellt, sein durch Wasserwägung bestimmtes Volumen beträgt 1,850 cm^3, das spezifische Gewicht ist 7,84, dasselbe spielt aber bei der Berechnung keine Rolle.

Von diesem Eisenellipsoid nahm ich die Nullkurve auf, als Stufenzahl wählte ich 14, weil ich mit dieser auch die Messungen an den Vanadium-Legierungen vornahm. Aus der Kurve bestimmte ich nun rückwärts die Stromstärken, für welche erstens $\mathfrak{H}$, zweitens $\mathfrak{B}$ und drittens μ in gleichen Stufen fortschreiten. Leider konnte ich mit meinen Widerständen nicht immer genau die gewünschte Stromstärke herstellen, so daß die Stufen nicht ganz gleichmäßig ausgefallen sind, doch treten die Versuchsergebnisse genügend deutlich hervor. Ich lasse hier die erhaltenen Werte, soweit sie Interesse bieten, folgen.

Tabelle 3.

Versuche über Stufenwahl.

Nummer der Stufe	I. Gleiche $\mathfrak{H}$-Stufen		II. Gleiche $\mathfrak{B}$-Stufen		III. Gleiche μ-Stufen		
	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}_{\mathrm{I}}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}_{\mathrm{II}}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}_{\mathrm{III}}$	μ
1	5,45	3 644	3,48	1 269	1,91	359	188
2	11,32	9 095	4,75	2 520	2,92	836	286
3	15,55	11 295	5,68	3 705	3,83	1 473	385
4			7,06	5 346	4,73	2 336	494
5			7,95	6 418	5,41	3 219	595
6			9,13	7 437	6,35	4 453	701
7			10,81	8 720	8,01	6 455	806
8			13,17	10 170	13,81	10 610	768
9			16,35	11 585			

Für $\mathfrak{B}$ bis zirka 5000 liegt also Nullkurve III mit sechs Stufen am tiefsten, darüber liegt II mit drei Stufen, während der eine Wert 3644 von I für $\mathfrak{H} = 5{,}45$ noch höher liegt, für ihn ist $\mathfrak{B}_{\mathrm{II}} = 3420$ und $\mathfrak{B}_{\mathrm{III}} = 3280$, also um 6 Proz. bzw. 10 Proz. niedriger. Dann nähern sich II und III. Bei $\mathfrak{B}_{\mathrm{II}} = 7500$ liegt $\mu_{\max} = 815$, doch liegen hier keine Punkte von I und III in der Nähe, so daß ein genauer Vergleich nicht möglich ist, die Differenzen sind aber geringer geworden. Die achte Stufe von III stellt einen sehr großen Sprung dar, dadurch kommt III für $\mathfrak{H} = 13{,}81$ mit $\mathfrak{B}_{\mathrm{III}} = 10610$ am höchsten zu liegen, wofür $\mathfrak{B}_{\mathrm{I}} = 10520$ und $\mathfrak{B}_{\mathrm{II}} = 10470$ wird, also um 0,8 Proz. bzw. 1,3 Proz. niedriger. Ein großer Sprung bewirkt daher eine Höherlegung der Induktionskurve. Bei noch größeren Feldstärken werden die Unterschiede aber so minimal, daß sie innerhalb der Fehlergrenzen liegen. So ergibt die neunte Stufe von I für $\mathfrak{H} = 52{,}1$ die Induktion 16175, während die dreizehnte Stufe von II bzw. III für $\mathfrak{H} = 50{,}1$ $\mathfrak{B} = 16110$ bzw. für $\mathfrak{H} = 50{,}7$ $\mathfrak{B} = 16150$ ergeben, so daß also für größere Feldstärken der Einfluß der Stufenzahl und Stufengröße verschwindend klein wird.

Das Ergebnis ist also:

Für geringe Feldstärken kann der Einfluß der Größe jeder Stufe beträchtlich werden, dabei entsprechen größeren Sprüngen höhere Induktionswerte; für mittlere Felder nimmt der Einfluß der Stufengröße schnell ab und verschwindet für große

Felder. Es ist also bei kleinen Feldern durchaus nicht gleichgültig, wie groß man die einzelnen Sprünge wählt; besonders wenn man vergleichende Messungen machen will, ist es notwendig, daß nicht nur die Stufenzahlen ähnlich groß sind, sondern auch die einzelnen Stufen in ähnlicher Weise aufeinanderfolgen. Natürlich sind diese Umstände um so mehr zu beachten, je magnetisch weicher ein Material ist.

Um nun einerseits eine genügende Zeichengenauigkeit an stark gekrümmten Stellen der Kurve und andererseits Ähnlichkeit in der Größe und Folge der Induktionssprünge zu erhalten, stellte ich stets orientierende Versuche über den ungefähren Verlauf der Kurve des zu untersuchenden Materials an, was mir dadurch erleichtert wurde, daß die Skalenausschläge direkt proportional der Magnetisierung sind. Die so erhaltene Stufenfolge dürfte wohl die „gewöhnliche“ genannt werden, weil sie einige Ähnlichkeit mit der von manchen anderen Forschern mehr oder weniger unbewußt gewählten hat, und die so erhaltenen Induktionen im allgemeinen Mittelwerte darstellen werden.

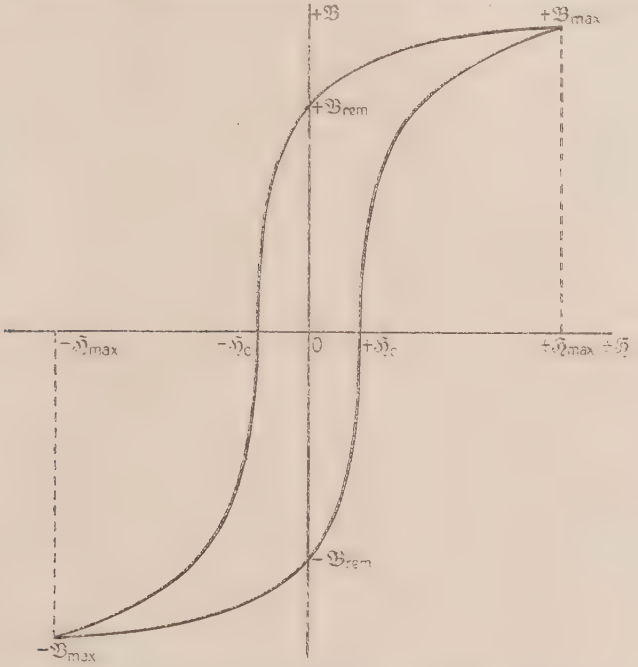
Die eben beschriebenen Ergebnisse der Versuche über die Stufengröße beziehen sich auf die Nullkurve. Sie können ohne weiteres auch auf die Hysteresisschleife angewandt werden, liefern aber keine Aussage über die Koerzitivkraft $\mathfrak{H}_c$. Für diese kommt wohl auch nur eine Abhängigkeit von der Stufenzahl in Frage. Über den Einfluß der Letzteren auf die Hysteresisschleife sind zahlreiche Arbeiten veröffentlicht worden, so von C. Fromme[1]), H. Lehmann[2]), M. Wien[3]), E. Gumlich und E. Schmidt[4]), P. Holitscher[5]), M. Heyse[6]), F. Rücker[7]), R. Reinicke[8]), M. Otto[9]) und C. Asmus[10]). Dieselben sind

1) C. Fromme, Wied. Ann. 43. p. 256. 1891.
2) H. Lehmann, Wied. Ann. 48. p. 422. 1893.
3) M. Wien, Wied. Ann. 66. p. 860. 1898.
4) E. Gumlich u. E. Schmidt, Elektrotechn. Zeitschr. 21. p. 233. 1900; sowie E. Gumlich, Elektrotechn. Zeitschr. 27. p. 988. 1906.
5) P. Holitscher, Drud. Ann. 3. p. 698. 1900.
6) M. Heyse, Inaug.-Diss. Halle. p. 33. 1901.
7) F. Rücker, Inaug.-Diss. Halle. p. 7—73. 1905.
8) R. Reinicke, Inaug.-Diss. Halle. 1908.
9) M. Otto, Inaug.-Diss. Halle. 1909 und Verh. d. D. Phys. Ges. 12. p. 240. 1910.
10) C. Asmus, Inaug.-Diss. Halle. 1910.

nach verschiedenen Methoden ausgeführt, ihre Ergebnisse stimmen in der Hauptsache darüber überein, daß die Magnetisierung mit abnehmender Stufenzahl steigt. In bezug auf die Koerzitivkraft widersprechen sich aber zwei der eingehendsten Arbeiten, nämlich die von E. Gumlich und E. Schmidt und die von Rücker. Die ersteren finden mittels der magnetometrischen Methode, daß der remanente Magnetismus, die Koerzitivkraft und der Hysteresisverlust mit der Größe der Sprünge abnehmen, während die maximale Induktion bei höheren Feldstärken nicht beeinflußt wird. Speziell werden bei weichem Material bis zu 10 Proz. Differenzen für $\mathfrak{H}_c$ gefunden. F. Rücker dagegen findet für $\mathfrak{H}_c$ und E bei Ringuntersuchungen öfters das Gegenteil, wie dies aus seinen Figuren 14, 18, 25, 26, 27 und 30 hervorgeht, bei $\mathfrak{H}_c$ betragen die Unterschiede sogar ebenfalls bis zirka 10 Proz.; bei Drahtuntersuchungen nach der unipolaren Methode findet er aber keinen Einfluß auf $\mathfrak{H}_c$. Hierbei möchte ich übrigens erwähnen, daß in F. Rückers Dissertation auf Seite 8, Zeile 4, ein sinnentstellender Fehler in dem Zitat der Arbeit von E. Gumlich und E. Schmidt unterlaufen ist. Es heißt dort nämlich, daß sich „mit wachsender Stufenzahl eine Abnahme des remanenten Magnetismus und der Koerzitivkraft“ zeige und sollte heißen „mit abnehmender Stufenzahl“. C. Asmus fand bei ballistischen Versuchen mit Kobalt keinen Einfluß der Stufenzahl auf $\mathfrak{H}_c$. Dagegen konnte E. Gumlich seine Ergebnisse durch neue magnetometrische Messungen bestätigen und sogar noch weit höhere Differenzen für $\mathfrak{H}_c$ beim Übergang von der stetigen Magnetisierung zu der mittels großer Sprünge feststellen.

Diese sich widersprechenden Versuchsergebnisse veranlaßten mich, mit meinem empfindlichen Magnetometer den Einfluß der Stufenzahl auf die Koerzitivkraft zu bestimmen. Dabei möchte ich an Hand der Fig. 5 noch auf etwas aufmerksam machen: Im allgemeinen wird unter der Stufenzahl die Zahl der Stufen von $\mathfrak{H} = 0$ bis $\mathfrak{H}_{max}$ verstanden, von $\mathfrak{H}_{max}$ zurück nach $\mathfrak{H} = 0$ ist sie dann ebenso groß; bedenkt man nun, daß beim aufsteigenden Ast die Induktion von $-\mathfrak{B}_{rem}$ bis $+\mathfrak{B}_{max}$ wächst, beim absteigenden aber nur von $+\mathfrak{B}_{max}$ auf $+\mathfrak{B}_{rem}$ fällt, aber die Induktion dem Material eigentümlich ist und nicht die Feldstärke, so sind meiner Ansicht nach die Induktions-

sprünge für beide Äste entschieden zu ungleich groß. Deshalb verteilte ich die einzelnen Stufen gleichmäßig auf die zwei Kurvenäste von $+ \mathfrak{H}_c$ bis $+ \mathfrak{H}_{max}$, also von $\mathfrak{B} = 0$ bis $+ \mathfrak{B}_{max}$, und von $+ \mathfrak{H}_{max}$ bis $- \mathfrak{H}_c$, also von $+ \mathfrak{B}_{max}$ bis $\mathfrak{B} = 0$. Als „Stufenzahl" bezeichne ich nun die Zahl der von $+ \mathfrak{B}_{max}$ bis $- \mathfrak{B}_{max}$ hergestellten Sprünge, also die Hälfte der Stufen eines ganzen Zyklus. Bei den andern Autoren wäre dies das Doppelte



Schematische Hysteresisschleife.
Fig. 5.

ihrer Stufenzahl. Übrigens hat auch E. Gumlich[1]) darauf hingewiesen, daß bei gleichen Feldstärkestufen die Induktionssprünge ganz ungleich groß werden, er sucht sogar F. Rückers Messungsergebnisse durch die Nichtbeachtung dieses Umstandes zu erklären.

Jede Messung nahm ich so vor, daß das Material zuerst etwa sechs Magnetisierungszyklen mit den gewählten 16 Stufen

1) E. Gumlich, Elektrotechn. Zeitschr. 27. p. 989. 1906.

unterworfen wurde, um die sogenannte molekulare Akkommodation unschädlich zu machen, dann wurden zwei vollständige Zyklen abgelesen, hierauf wurde sofort einigemale der Zyklus mit nur fünf Stufen ausgeführt und zuletzt bei zwei Zyklen der maximale Ausschlag zwecks Bestimmung von $\mathfrak{B}_{max}$ abgelesen, ferner wurde durch geeignete Wahl der Feldstärke auch ein möglichst kleiner Ausschlag hergestellt, der die direkte Bestimmung von $\mathfrak{H}_c$ ermöglichte, während bei dem 16-Stufenversuch $\mathfrak{H}_c$ aus den beiden nächstgelegenen Werten berechnet wurde. Die Zyklen nahm ich für zwei maximale Feldstärken, nämlich 30 und 80 Gauß, auf. Als Versuchsmaterial benutzte ich die Vanadiumlegierungen I, II und III im Zustand A, ferner für $\mathfrak{H} = 80$ Gauß auch das schon erwähnte Flußeisen. Die hier in Betracht kommenden Werte sind in den folgenden Tab. 4 und 5 zusammengestellt (die Zahlenwerte der Zyklen

Tabelle 4.

Stufenzahl-Versuche für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 30 Gauß.

Material	Stufenzahl	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}_{max}$	$\mathfrak{H}_c$	aus Ablesungen bei $\mathfrak{H}$	aus Ablesungen bei $\mathfrak{B}$	Zunahme von $\mathfrak{H}_c$ in Proz.
I					4,44	− 509	
	5	30,6	14 260	4,61	4,95	+1001	
	16	30,9	14 310	4,85			5,2
II	5	30,8	14 990	5,94	5,95	57	
	16	30,8	14 970	6,09			2,5
III	5	31,5	14 210	5,76	5,82	318	
	16	31,6	14 180	6,04			4,8

Tabelle 5.

Stufenzahl-Versuche für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 80 Gauß.

Material	Stufenzahl	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}_{max}$	$\mathfrak{H}_c$	aus Ablesungen bei $\mathfrak{H}$	aus Ablesungen bei $\mathfrak{B}$	Zunahme von $\mathfrak{H}_c$ in Proz.
I	5	79,2	16 050	4,68	4,69	52	
	16	80,3	16 140	4,91			4,9
II	5	83,0	16 850	6,20	6,21	88	
	16	83,0	16 870	6,41			3,4
III	5	80,2	16 140	5,94	5,94	24	
	16	80,2	16 150	6,18			4,0
Flußeisen	5	79,9	16 820	4,94	4,94	12	
	16	79,9	16 790	5,16			4,4

mit 16 Stufen sind den Tab. 7—9 des Abschnitts 11 entnommen).

Aus diesen Tabellen ist ersichtlich, daß bei dem untersuchten Material ein Einfluß der Stufenzahl auf $\mathfrak{B}_{max}$ für $\mathfrak{H} = 30$ Gauß nicht mehr feststellbar ist. Dagegen hängt die Koerzitivkraft einwandfrei von der Stufenzahl ab, sie wird stets um mehrere Prozent größer für die größere Stufenzahl, die prozentuale Differenz selbst wird größer für kleineres $\mathfrak{H}_c$, also für magnetisch weicheres Material. Speziell dieses Ergebnis zeigt deutlich die hervorragenden Eigenschaften meines Magnetometers, da es diese Abhängigkeit selbst bei den kleinen Unterschieden in der Koerzitivkraft (diese steigt nur von 4,6 bis auf 6,4 Gauß) noch festzustellen gestattet. Diese Versuche bestätigen also vollständig die Ergebnisse von E. Gumlich und E. Schmidt, denn wenn $\mathfrak{B}_{max}$ gleich bleibt, die Induktionswerte aber schneller abnehmen bei kleinen Stufenzahlen, so wird $\mathfrak{B}_{rem}$ etwas kleiner werden [das sogenannte Waltenhofensche Phänomen[1])], $\mathfrak{H}_c$ wird ebenfalls kleiner, also muß auch der Hysteresisverlust kleiner werden für kleinere Stufenzahl. Dies dürfte zweifellos den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen, denn für solche Versuche ist die magnetometrische Methode die einzig brauchbare, da sie frei von Fehlern ist, die von der magnetischen Nachwirkung oder Viskosität des Materials herrühren. Solche Verzögerungserscheinungen können aber die Resultate von ballistischen Messungen beträchtlich fälschen, wie dies auch F. Rücker selbst fand[2]).

Zusammengefaßt ergeben also die Stufenversuche: Die Koerzitivkraft wird größer mit größerer Stufenzahl, dabei ist ihre prozentuale Zunahme um so größer, je kleiner sie selbst ist.

11. Magnetisierbarkeit der Vanadiumlegierungen nach der Herstellung der Ellipsoide (A).

Zuerst seien einige für die folgenden Abschnitte geltenden Bemerkungen vorausgeschickt.

1) A. v. Waltenhofen, Wien. Ber. 48. p. 564. 1863 und Pogg. Ann. 120. p. 650. 1863.

2) F. Rücker, Inaug.-Diss. Halle. p. 74—106. 1905.

Die Untersuchungen führte ich bei jedem Material in jedem Zustand für zwei verschiedene maximale Feldstärken aus, nämlich für $\mathfrak{H} = 80$ Gauß, wozu das Spulenfeld infolge der entmagnetisierenden Wirkung der Ellipsoide gewöhnlich etwa 100 Gauß betragen mußte, und für $\mathfrak{H} = 30$ Gauß, um den Einfluß der maximalen Feldstärke feststellen zu können. Die hierzu notwendigen Stromstärken stellte ich für jeden Zustand durch Vorversuche fest, ebenso die nach den Überlegungen des Abschnitts 10 gewählten Zwischenwerte. Zur Aufnahme der Nullkurven benutzte ich 14 Stufen von $\mathfrak{B} = 0$ bis $\mathfrak{B}_{max}$, für die Hysteresisschleifen 16 Stufen von $+\mathfrak{B}_{max}$ bis $-\mathfrak{B}_{max}$, die gleichmäßig über die ganze Kurve verteilt wurden. Dadurch wird der Einfluß verschiedener Stufenzahlen für dieselbe Kurvenart ganz ausgeschaltet und der Einfluß der Stufenwahl immer ein ähnlicher.

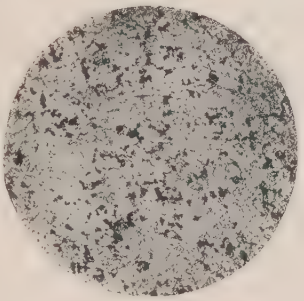
Aus den am Amperemeter und Magnetometer abgelesenen Werten habe ich mittels der in den Abschnitten 4 und 5 angegebenen Formeln (2), (3), (4), (5) und (7) die zugehörigen Werte von $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$ und μ berechnet, und in Tabellen- und Kurvenform zusammengestellt. Die Koerzitivkraft $\mathfrak{H}_c$ berechnete ich aus den (2) am nächsten gelegenen Kurvenpunkten, was infolge des fast geraden Verlaufs der Kurven an dieser Stelle unbedenklich getan werden darf, die remanente Induktion $\mathfrak{B}_{max}$ und die maximale Permeabilität μ_{max} las ich aus den Kurven ab, den Hysteresisverlust E bestimmte ich durch Ausmessen der Schleife mittels eines kompensierten Planimeters von A. Ott in Kempten. Diese Zahlenwerte, sowie die wichtigsten Kurven sind den betreffenden Tabellen beigefügt.

Um eine eventuelle Unsymmetrie in der Ellipsoidform unschädlich zu machen, ließ ich jedesmal durch Umlegen beide Spitzen nacheinander zum Magnetometer hinweisen, welche Vorsichtsmaßregel sich besonders nach der Wärmebehandlung als zweckmäßig erwies, da sich die Ellipsoide hierbei etwas verzogen hatten, was aber infolge ihrer günstigen Massenverteilung gewöhnlich nur höchstens 1 Proz. Differenzen ergab, aber die $^1/_2$ Proz. betragenden maximalen Beobachtungsfehler natürlich überstieg.

Die Nullkurven wurden sofort nach vollständiger Entmagnetisierung aufgenommen und vor jeder neuen Aufnahme

wurden die Ellipsoide wieder neu entmagnetisiert. Vor der Aufnahme einer Hysteresiskurve wurde ebenfalls entmagnetisiert, dann mindestens fünfmal mit den gewählten Stufen zyklisch magnetisiert, hierauf zwei vollständige Zyklen aufgenommen, nach jeder Umlegung der Ellipsoide wurde zur Ausschaltung hierbei eventuell auftretender Änderungen wieder zweimal zyklisch magnetisiert und dann erst abgelesen.

Die Vorbehandlung des Materials bestand in zweistündigem Ausglühen bei 850°, langsamer Erkaltung, Abdrehen zu Ellipsoiden, mehrwöchigem Lagern, öfterer Magnetisierung und Entmagnetisierung.



Gefügebild der Legierung I im Zustand A in 100facher Linearvergrößerung.
Ferrit (hell) u. Perlit (dunkel).
Fig. 6.

Von den Mikrophotogrammen seien aus Platzersparnis hier nur die des Materials I veröffentlicht, da sie in den verschiedenen Zuständen die größten Unterschiede zeigen. I A (Fig. 6) zeigt deutlich die Kristallstruktur, die hellen Plättchen stellen Schnitte durch Ferritkristalle dar, sie bestehen aus kohlenstoffreiem Eisen, das aber Metalle wie Si, Mn und V, sowie Oxyde gelöst haben kann, die dunklen Inseln werden Perlit genannt, sie sind ein Gemenge aus Ferrit und Zementit (Fe_3C), die dunklen Punkte sind Einschlüsse, z. B. Schlacken, und Poren. Das Material II A zeigt fast nur Ferrit, während III A bei grober Kristallstruktur ziemlich viel ungleich verteilten Perlit aufweist.

Tabelle 6.

Versuchsdaten A.

Bezeichnung	Entmagnetisierungsfaktor	Volumen in cm^3	Spez. Gewicht
I	0,015504	1,895	7,84
II	0,015576	1,885	7,79
III	0,015550	1,886	7,75

Tabelle 7.

Nullkurven A.

I			II			III		
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ
1,73	327	189	1,99	169	85	1,97	231	117
2,92	835	286	3,48	456	131	3.27	520	158
4,08	1 775	435	4,86	1 115	229	4,92	1 573	319
5,12	3 240	633	6,00	2 495	416	5,83	2 530	433
5,89	4 765	807	6,73	4 000	594	6,82	3 980	583
7,22	7 005	972	7,93	6 385	804	8,16	6 080	745
9,02	9 035	1002	9,33	8 635	925	9,82	8 130	828
11,09	10 340	932	10,77	10 270	953	11,72	9 625	821
13,83	11 515	831	13,3	11 725	882	14,3	10 985	772
19,9	12 900	645	18,7	13 410	716	19,75	12 720	643
25,3	13 530	537	23,9	14 270	596	25,0	13 675	545
40,6	14 620	360	38,9	15 520	399	39,8	14 880	374
60,2	15 390	255	58,2	16 340	281	59,8	15 700	262
81,0	15 960	197	78,8	16 890	214	80,5	16 220	203
μ_{max} bei 8,4	8 400	1010	10,8	10 200	955	10,2	8 500	830

Tabelle 8.

Hysteresiskurven A für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 30 Gauß.

I		II		III	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
30,90	14 310	30,8	14 970	31,6	14 180
8,92	13 220	8,15	14 060	9,14	13 200
0,73	11 780	— 0,25	12 870	0,90	11 870
— 3,51	7 835	— 4,67	9 730	— 3,64	8 950
— 3,96	6 320	— 5,45	7 530	— 4,80	6 960
— 4,10	5 000	— 5,73	4 615	— 5,34	4 215
— 4,23	3 400	— 5,90	3 070	— 5,60	2 710
— 4,70	1 640	— 6,01	1 700	— 5,80	1 435
— 4,87	— 220	— 6,08	82	— 6,02	87
— 5,40	— 2 210	— 6,53	— 1 890	— 6,55	— 1 940
— 6,00	— 4 515	— 7,11	— 3 720	— 7,22	— 3 605
— 6,97	— 6 950	— 7,80	— 6 320	— 8,23	— 5 980
— 8,58	— 9 110	— 9,12	— 8 845	— 9,90	— 8 195
— 11,6	— 11 080	— 11,8	— 11 195	— 12,6	— 10 380
— 16,1	— 12 480	— 15,95	— 12 870	— 16,8	— 12 055
— 20,7	— 13 220	— 19,9	— 13 760	— 20,7	— 12 840
$\mathfrak{B}_{rem}$ . . . . =	11 440		12 920		11 530
$\mathfrak{H}_c$ . . . . . =	4,85		6,09		6,04
E . . . . . =	12 200		16 050		15 070

Tabelle 9.

Hysteresiskurven A für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 80 Gauß.

I		II		III	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
80.3	16 140	83,0	16 870	80,2	16 150
13,9	14 110	13,7	15 100	14,2	14 380
0,60	12 020	— 0,57	13 370	— 2,80	10 480
— 3,50	8 350	— 5,01	9 680	— 4,21	8 660
— 4,05	6 500	— 5,66	7 810	— 4,88	7 070
— 4,41	3 570	— 5,94	4 800	— 5,44	4 380
— 4,63	1 905	— 6,07	3 540	— 5,70	2 710
— 4,87	183	— 6,26	1 200	— 6,01	966
— 5,23	— 1 280	— 6,46	— 402	— 6,26	— 496
— 6,00	— 3 800	— 7,15	— 3 020	— 7,04	— 2 915
— 7,25	— 6 750	— 8,08	— 6 395	— 8,45	— 5 980
— 8,94	— 8 910	— 9,61	— 8 870	— 10,2	— 8 225
— 12,04	— 10 880	— 12,45	— 11 165	— 13,1	— 10 420
— 16,4	— 12 310	— 16,65	— 12 910	— 17,3	— 12 120
— 26,25	— 13 785	— 26,6	— 14 580	— 27.1	— 13 760
— 46,3	— 15 065	— 47.2	— 15 900	— 47,3	— 15 120
$\mathfrak{B}_{rem}$ . . . . =	11 720		13 540		12 460
$\mathfrak{H}_c$ . . . . . =	4,91		6,41		6,18
E . . . . . =	17 100		22 800		22 100

Aus diesen Tabellen und den nach ihnen gezeichneten Kurven für den Zustand A ist ersichtlich, daß I die höchste Permeabilität $\mu_{max} = 1010$ besitzt, von $\mathfrak{B} = 10\,000$ und von $\mathfrak{B} = 13200$ an liegen aber die Permeabilitätskurven von II und III höher, ihre Nullkurven liegen von $\mathfrak{H} = 10{,}8$ und $\mathfrak{H} = 21{,}3$ an höher, die höchste Induktion erreicht II mit 16750 bei 80 Gauß. Die maximalen Permeabilitäten von II und III sind um 5,4 Proz. und 18 Proz. kleiner als bei I, die maximalen Induktionen aber um 5 Proz. und 2 Proz. größer. Die remanente Induktion ist bei II mit 12460 um 15 Proz. und bei III um 6 Proz. höher als bei I. Die Koerzitivkraft ist bei II um 31 Proz. und bei III um 26 Proz. höher als bei I (4,9 Gauß). Der Hysteresisverlust ist bei II um 33 Proz. und bei III um 29 Proz. größer als bei I (17 100 Erg/cm³).

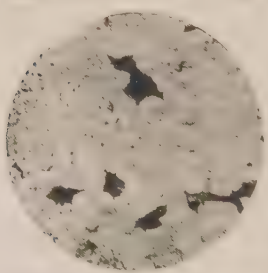
Zusammenfassend läßt sich also sagen: Material I ist magnetisch am weichsten, II zeigt die höchste maximale und remanente Induktion, III hält sich jeweils zwischen I und II.

Da J. J. Lonsdale eine Legierung mit 3.5 Proz. V, 0,6 Proz. C, 0,2 Proz. Mn und einer Spur von Si untersucht

hat, so kommt zum Vergleich in erster Linie mein Material III in Betracht, da es eine ähnliche Zusammensetzung besitzt. Ich gebe hier aus seinen Tabellen und Kurven die wichtigsten Werte, die der Stahlring gleich nach seiner Herstellung besaß, wieder und füge in Klammern die in bezug auf diese Werte berechneten prozentualen Differenzen der Legierung III an, dabei möge ein + bzw. −-Zeichen bedeuten, daß die Werte von III um soviel Prozente größer bzw. kleiner sind als die von Lonsdale angegebenen Zahlen. Bei ihm ist z. B. $\mu_{max} = 425$ bei $\mathfrak{H} = 20{,}5$ (+ 96 Proz., bei $\mathfrak{H} = 10{,}2$), für $\mathfrak{H} = 80$ wird $\mathfrak{B}_{max} = 14000$ (+ 16 Proz.), $\mathfrak{B}_{rem} = 11000$ (+ 13 Proz.), $\mathfrak{H}_c = 13$ (− 52 Proz.), $E = 56500$ (− 61 Proz.). Die Zahlen zeigen klar, daß unter der Annahme richtiger Messungen J. J. Lonsdale ein magnetisch ziemlich schlechtes Material besaß, der Vanadiumgehalt kann aber nicht die Ursache hiervon gewesen sein.

12. Magnetisierbarkeit der ausgeglühten Legierungen (B).

Um das Material von der durch das Abdrehen bedingten mechanischen Härtung zu befreien, und um zugleich den Einfluß eines abermaligen Ausglühens festzustellen, schickte ich die Legierungen im März 1918 der Versuchsanstalt der Friedr. Krupp A.-G. mit dem Wunsch, sie so zu behandeln, daß sie magnetisch möglichst weich würden, ohne ihre Zusammensetzung zu ändern. Sie wurden nun 1 Stunde bei 900° geglüht und innerhalb 18 Stunden auf Zimmertemperatur abgekühlt. Beides geschah im Stickstoffstrom, trotzdem oxydierte sich das Material ein wenig, die Oxydschicht wurde mit Schmiergelpapier entfernt. Nach dem Wiedereintreffen untersuchte ich die Stähle sofort.



Gefügebild der Legierung I im Zustand B in 100facher Linearvergrößerung. Ferrit (hell) und Perlit (dunkel).

Fig. 7.

Das Mikrophotogramm I B (Fig. 7) zeigt Ferrit und große Perlitinseln, von denen jede etwa 0,8–0,9 Proz. C enthält; II B zeigt große Ferritkristalle, aber nur wenig Perlit, der Kohlenstoff ist hier wahrscheinlich zu einem großen Teil an

das Vanadium allein gebunden; III B zeigt feinere und etwas homogenere Struktur als III A, der perlitische Anteil scheint etwas zurückgegangen zu sein, was wohl auf Rechnung des Vanadiums zu setzen wäre, ferner sind viele Einschlüsse vorhanden.

Der große Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Magnetisierbarkeit ist seit langem bekannt, im großen ganzen ist man aber trotz vieler Untersuchungen bis vor kurzem nicht über die einfachsten Erfahrungstatsachen hinaus gekommen. Man wußte eigentlich nur, daß das sogenannte „Ausglühen" jedes Material magnetisch weicher mache, wobei man annahm, daß der Grund hierfür in Strukturänderungen bestehe, man war sich aber über diese selbst und über den Einfluß der Höhe der Glühtemperatur, der Dauer des Glühens, der Art der Abkühlung, der umgebenden Atmosphäre und des Drucks derselben nicht im klaren, was auch darin seinen Grund haben mag, daß diese Einflüsse wieder von der chemischen Zusammensetzung und der Art der Herstellung des Materials wesentlich modifiziert werden. Bis jetzt war es daher allein die hüttenmännische Erfahrung, was den Ausschlag geben konnte. Im letzten Jahrzehnt sind nun über obige Fragen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt mit Unterstützung der Technik umfassende Versuche angestellt worden, wobei auch die mikrophotographischen Untersuchungsergebnisse in weitem Umfang in den Kreis der Betrachtungen gezogen wurden. So behandelt z. B. der soeben erschienene erste Teil der Abhandlung[1], den Einfluß der chemischen Zusammensetzung und der thermischen Vorbehandlung auf die Magnetisierbarkeit, den Widerstand und die Dichte der C-, Si-, Al- und Mn-Legierungen.

Aus diesen Versuchen dürfte mit Sicherheit hervorgehen, daß die Verbesserung der magnetischen Eigenschaften, oder was dasselbe ist, die Verminderung der Ummagnetisierungsarbeit, durch das Ausglühen in erster Linie eine Folge der Austreibung der vorhandenen Gase, nämlich C, O, H, N, CO, CO_2 ist, wobei sich die Überlegenheit der Glühung im Vakuum

1. Wiss. Abh. der Phys.-Techn. Reichsanstalt. 4. Heft 3. p. 267 bis 420. 1918.

herausstellte, während die mit dem Glühen verbundene Vergrößerung der Kristallkörner einen verschlechternden Einfluß haben soll.

Für meine Legierungen ergibt sich also auf Grund ihrer thermischen Vorbehandlung und ihrer Mikrophotogramme, daß die Verbesserung durch das zweite Ausglühen nicht sehr erheblich sein kann, denn die zwei gefährlichsten Gase, C und O, sind durch das Vanadium in beträchtlichem Maße unschädlich gemacht, der Wegfall der mechanischen Härtung, der bei den spitz auslaufenden Ellipsoiden stärker ins Gewicht fällt, als bei Stäben, dürfte aber in Betracht kommen.

Ich lasse nun die Versuchsdaten und die Messungsergebnisse folgen.

Tabelle 10.

Versuchsdaten B.

Bezeichnung	Entmagnetisierungsfaktor	Volumen in cm^3	Spez. Gewicht
I	0,015234	1,848	7,81
II	0,015355	1,845	7,79
III	0,015386	1,849	7,74

Tabelle 11.

Nullkurven B.

I			II			III		
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ
1,75	285	163	1,83	209	114	1,76	266	151
2,81	876	312	3,23	528	164	3,06	618	202
3,63	2 080	573	4,47	1 360	304	4,45	1 367	307
4,42	3 730	842	5,32	2 970	558	5,45	2 865	526
5,23	5 330	1020	5,92	4 705	794	6,14	4 460	743
6,38	7 630	1195	6,65	7 350	1100	7,04	7 025	998
8,30	9 640	1185	8,00	9 780	1225	8,58	9 280	1082
10,17	11 030	1084	9,60	11 440	1190	10,4	10 740	1035
12,9	12 230	946	12,1	12 805	1061	13,15	11 920	907
18,7	13 660	731	18,0	14 220	790	19,2	13 170	685
24,05	14 375	598	23,45	14 770	630	24,7	13 720	557
39,1	15 470	395	38,7	15 700	406	39,95	14 640	366
58,65	16 220	274	58,35	16 360	282	59,75	15 290	256
79,6	16 780	211	79,4	16 850	212	80,7	15 800	196
μ_{max} bei 7,1	8 500	1210	8,4	10 300	1230	8,8	9 500	1085

Tabelle 12.

Hysteresiskurven B für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 30 Gauß.

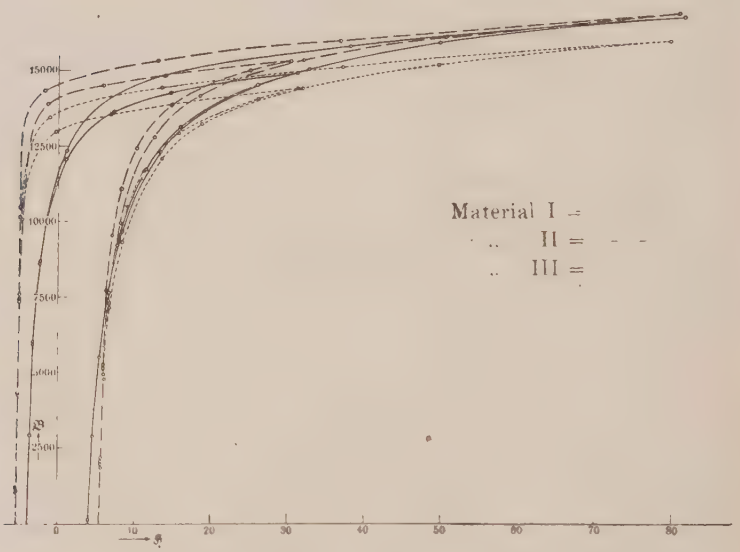
I		II		III	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
31,55	14 920	30,65	15 330	31,55	14 420
14,93	14 260	14,0	14 825	15,0	13 880
7,30	13 640	6,02	14 520	7,00	13 530
1,11	12 050	— 1,33	13 910	— 0,26	12 975
— 2,24	8 605	— 4,65	10 070	— 4,71	10 425
— 3,20	6 010	— 5,01	7 610	— 4,97	7 340
— 3,56	2 940	— 5,24	4 310	— 5,19	4 235
— 3,97	— 116	— 5,43	1 145	— 5,37	1 090
— 4,66	— 2 890	— 5,62	— 2 055	— 5,70	— 1 960
— 5,57	— 5 480	— 5,82	— 5 130	— 6,07	— 4 930
— 6,55	— 7 605	— 6,41	— 7 720	— 6,60	— 7 385
— 7,85	— 9 210	— 7,19	— 9 550	— 7,70	— 9 080
— 9,42	— 10 515	— 8,39	— 11 080	— 9,15	— 10 480
— 11,6	— 11 730	— 10,4	— 12 420	— 11,3	— 11 670
— 16,1	— 13 140	— 15,0	— 13 825	— 16,0	— 12 920
— 26,25	— 14 540	— 25,3	— 15 030	— 26,3	— 14 075
$\mathfrak{B}_{rem}$ . . . . = 11 330			14 080		13 000
$\mathfrak{H}_c$ . . . . . = 4,00			5,50		5,49
E . . . . . = 10 970			14 570		13 880

Tabelle 13.

Hysteresiskurven B für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 80 Gauß.

I		II		III	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
82,3	16 750	81,6	16 850	80,4	15 920
38,4	15 810	37,1	16 010	37,4	15 130
14,25	14 815	13,25	15 320	13,7	14 440
1,18	12 330	— 1,66	14 335	— 1,00	13 460
— 2,25	8 690	— 4,89	10 160	— 4,85	10 490
— 3,20	6 020	— 4,98	7 460	— 5,07	7 410
— 3,57	2 930	— 5,23	4 270	— 5,27	4 300
— 4,02	— 124	— 5,49	1 035	— 5,52	1 230
— 4,68	— 2 920	— 5,67	— 2 180	— 5,75	— 1 830
— 5,60	— 5 470	— 6,02	— 5 240	— 6,16	— 4 770
— 6,71	— 7 615	— 6,76	— 7 665	— 6,83	— 7 130
— 8,62	— 9 660	— 8,17	— 9 960	— 8,55	— 9 310
— 13,45	— 12 280	— 12,7	— 12 775	— 13,7	— 12 070
— 19,4	— 13 660	— 18,7	— 14 160	— 18,9	— 13 240
— 33,0	— 15 035	— 32,3	— 15 340	— 32,2	— 14 425
— 51,25	— 15 910	— 51,0	— 16 080	— 50,05	— 15 175
$\mathfrak{B}_{rem}$ . . . . = 11 600			14 530		13 610
$\mathfrak{H}_c$ . . . . . = 4,01			5,55		5,60
$\mathfrak{E}$ . . . . . = 16 000			20 100		19 800

Bei dem folgenden Vergleich der Messungsergebnisse füge ich in Klammern in Prozenten die Zu- bzw. Abnahme der Werte bei, bezogen auf den Zustand A. Diesmal hat II die höchste Permeabilität $\mu_{max} = 1230$ (+ 30 Proz.), aber bis $\mathfrak{B} = 9000$ liegt die Permeabilitätskurve von I höher, sein μ_{max} ist 1210 (+ 20 Proz.), III liegt am tiefsten, doch nimmt auch $\mu_{max} = 1085$ gegen A um 31 Proz. zu. Die Nullkurve II liegt von $\mathfrak{H} = 7.5$ an am höchsten. Die maximale Induktion von II für $\mathfrak{H} = 80$



Hysteresiskurven nach dem Ausglühen (Zustand B).
Fig. 8.

bleibt dieselbe wie bei A, bei I steigt sie um 4 Proz., bei III fällt sie um 2 Proz. $\mathfrak{B}_{rem}$ ist bei II mit 14 530 (+ 7,3 Proz.) wieder am höchsten, und um 25 bzw. 17 Proz. größer als bei I (– 1 Proz.) bzw. III (+ 9 Proz.). Solche hohen Remanenzen werden gewöhnlich sofort nach dem Ausglühen beobachtet, doch wird nach einigem Lagern des Materials das steile Knie der Hysteresisschleife (Fig. 8) wieder etwas flacher. $\mathfrak{H}_c$ bleibt bei I mit 4,0 (– 18 Proz.) am kleinsten, bei II ist $\mathfrak{H}_c$ um 39 Proz. (– 13 Proz.) und bei III um 40 Proz. (– 9,4 Proz.) höher als bei I. Der Hysteresisverlust E ist bei I mit 16 000

(— 6,4 Proz.) am geringsten, bei II um 26 Proz. (— 12 Proz.) und bei III um 24 Proz. (— 10,4 Proz.) größer.

Es ergibt sich also:

Das Ausglühen hat alle drei Materialien verbessert, und zwar am meisten die Permeabilität, doch sind die Differenzen lange nicht so beträchtlich, wie sie sonst schon beobachtet wurden. Material I ist wiederum das weichste, II besitzt die höchsten Werte von μ_{max}, $\mathfrak{B}_{max}$, $\mathfrak{B}_{rem}$, III hat sich am wenigsten geändert und ist daher an die letzte Stelle gerückt.

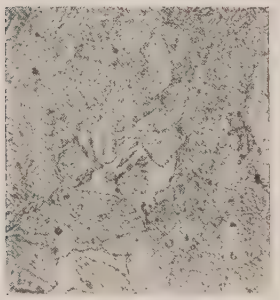
Diese Ergebnisse stehen in direktem Widerspruch zu den Messungen von J. J. Lonsdale an seiner bei etwa 925° geglühten und langsam abgekühlten Legierung, denn er sagt, daß diese Prozedur seinen „Stahl" härter gemacht habe. Nach dem Einfluß, den das Vanadium auf die Legierung ausübt, kann es kaum als Ursache dieser auffallenden Wirkung des Ausglühens in Betracht kommen. Zum Vergleich lasse ich nun seine Werte folgen und füge wie in Abschnitt 11 in Klammern die prozentualen Unterschiede für mein ähnlich legiertes Material III an: $\mu_{max} = 310$ bei $\mathfrak{H} = 27$ (+ 250 Proz., bei $\mathfrak{H} = 8{,}8$), für $\mathfrak{H} = 80$ wird $\mathfrak{B}_{max} = 13\,300$ (+ 20 Proz.), $\mathfrak{B}_{rem} = 9\,150$ (+ 49 Proz.), $\mathfrak{H}_c = 17{,}6$ (— 68 Proz., also nur ein Drittel seines Wertes), $E = 64\,000$ (— 69 Proz.). Vergleicht man diese Zahlen mit denen des Abschnitts 11, so findet man, daß das Ausglühen dieses Material tatsächlich magnetisch noch schlechter gemacht hat, da bei III aber das entgegengesetzte der Fall ist, so resultieren natürlich solch große Differenzen. Ob und inwieweit nun eine falsche Wärmebehandlung die Schuld an dieser Verschlechterung trägt, läßt sich aus seinen kurzen Angaben nicht ersehen.

13. Magnetisierbarkeit der abgeschreckten Legierungen (C).

Da neben der Gewinnung eines magnetisch sehr weichen Materials auch die eines sehr harten notwendig ist, so pflegt man alle Eisenlegierungen auf ihre Härtbarkeit zu untersuchen. Das bequemste Mittel zum Härten ist der Kohlenstoff, da er aber dabei Zementit Fe_3C bildet und dieser nur eine Sättigungsintensität von 12 500 hat gegen 20 000 des Perlits und 21 600 des reinen Eisens[1]), so ist er nicht sehr rationell. Nun ver-

1) E. Gumlich, Ferrum. 10. p. 36. 1912.

leiht Wolframkarbid W_2C dem Eisen ebenfalls ein sehr starres Kleingefüge (auf dessen Bedeutung G. Mars[1]) hingewiesen hat), beläßt aber das Eisen in größerem Prozentsatz in seiner hohen Magnetisierbarkeit, deshalb werden die Magnetstähle in Friedenszeiten mit Wolfram legiert, ähnliche Dienste leisten übrigens bekanntlich auch Chrom und Molybdän[2]), welche derselben Gruppe des Periodischen Systems angehören wie Wolfram. Außer der chemischen Zusammensetzung des Materials hat natürlich auch der Härtungsprozeß selbst Einfluß auf die magnetischen Eigenschaften.



Gefügebild der Legierung I im Zustand C in 250 facher Linearvergrößerung.
Ferrit (hell) und Martensit (nadelig).

Fig. 9.

Zur Erzielung einer Härtung wurden die drei Legierungen bis 900° erhitzt und dann in Wasser abgeschreckt. Daraufhin wurden sie wieder untersucht.

Das Gefügebild I C (Fig. 9) zeigt neben wenig Ferrit den nach längerem Ätzen nadelig erscheinenden Martensit, also tatsächlich einen Gefügebestandteil von gehärtetem Material. II C zeigt fast dasselbe Aussehen, wie in geglühtem Zustand, eine Härtung ist daher nicht wahrzunehmen. III C zeigt wieder Ferrit und Perlit, das Gefüge ist gröber geworden, eine Härtung ist ebenfalls nicht festzustellen.

Tabelle 14.
Versuchsdaten C.

Bezeichnung	Entmagnetisierungsfaktor	Volumen in cm^3	Spez. Gewicht
I	0,015230	1,848	7,82
II	0,015377	1,847	7,78
III	0,015395	1,849	7,72

1) G. Mars, Stahl und Eisen. 29. p. 1770. 1909; und Die Spezialstähle. p. 268 und 304. 1912.

2) Mme. S. Curie, Bull. de la Soc. d'Encouragement. p. 36. 54 und 56. 1897; Compt. Rend. 125. p. 1165. 1897.

Tabelle 15.

Nullkurven C.

I			II			III		
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	μ
1,87	207	111	1,89	185	98	1,87	213	114
3,32	480	145	3,40	504	148	3,34	478	144
5,09	952	187	4,81	1 210	251	4,90	1 143	235
6,95	1 350	194	5,87	2 264	385	6,07	2 138	352
9,50	2 060	217	7,43	3 810	512	7,63	3 682	483
12,2	2 810	230	9,11	5 460	599	9,35	5 315	569
15,4	3 860	250	11,4	7 155	630	11,75	6 990	595
18,05	4 640	257	13,45	8 400	624	13,8	8 190	593
21,1	5 760	278	16,15	9 685	600	16,6	9 405	567
25,55	7 650	300	21,4	11 520	539	22,1	11 120	503
30,25	9 425	310	26,2	12 730	486	27,4	12 250	445
42,8	12 320	288	40,2	14 760	367	41,45	13 990	336
61,05	14 400	236	59,3	15 950	269	60,9	15 060	247
81,2	15 460	190	80,1	16 600	207	82,0	15 690	192
μ_{max} bei 30,8	9 600	310	12,0	7 500	630	12,5	7 500	595

Tabelle 16.

Hysteresiskurven C für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 30 Gauß.

I		II		III	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
32,7	10 430	29,1	13 360	29,8	12 800
18,85	9 630	14,9	12 710	15,65	12 100
6,79	8 460	5,80	11 240	4,40	10 330
1,77	7 765	1,57	10 020	— 0,29	8 770
— 2,20	6 520	— 1,54	8 620	— 3,08	6 710
— 5,76	4 810	— 4,24	6 040	— 4,80	3 910
— 8,63	3 170	— 4,92	4 020	— 5,66	1 200
— 12,0	1 330	— 5,42	1 925	— 7,10	— 2 420
— 15,95	— 911	— 6,58	— 1 550	— 10,05	— 5 760
— 19,0	— 2 835	— 8,29	— 3 750	— 12,8	— 7 880
— 21,4	— 4 630	— 10,1	— 5 645	— 15,6	— 9 315
— 23,3	— 5 990	— 12,7	— 8 030	— 18,1	— 10 220
— 25,6	— 7 700	— 15,3	— 9 550	— 21,3	— 11 160
— 27,8	— 8 810	— 20,8	— 11 540	— 24,1	— 11 790
— 30,15	— 9 680	— 25,0	— 12 620	— 26,85	— 12 300
$\mathfrak{B}_{rem}$ . . . . . =	7 230		9 360		8 650
$\mathfrak{H}_c$ . . . . . =	14,4		6,05		6,10
$\mathfrak{E}$ . . . . . =	20 040		14 220		13 190

Tabelle 17.

Hysteresiskurven C für $\mathfrak{H}_{max}$ = ca. 80 Gauß.

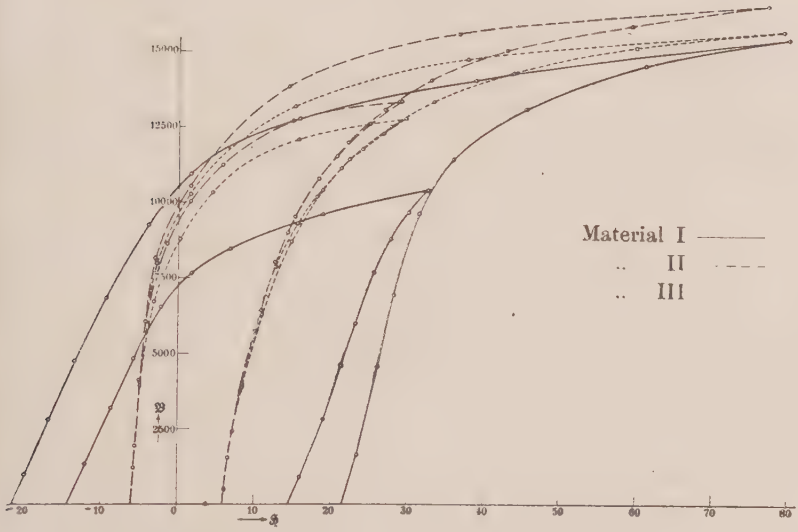
I		II		III	
$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$
80,6	15 440	77,7	16 570	79,8	15 700
39,0	14 080	36,8	15 630	37,95	14 780
15,9	12 780	14,45	13 860	15,25	13 200
1,54	10 940	1,54	10 540	1,65	10 270
− 3,93	9 250	− 3,08	8 150	− 2,79	7 960
− 9,28	6 805	− 4,93	4 030	− 5,03	4 105
− 13,4	4 720	− 6,18	− 520	− 6,30	− 463
− 16,75	2 785	− 8,53	− 3 980	− 8,55	− 3 870
− 19,8	991	− 10,9	− 6 420	− 10,95	− 6 280
− 23,4	− 1 655	− 14,4	− 9 010	− 14,85	− 8 710
− 26,2	− 4 565	− 18,4	− 10 800	− 18,9	− 10 435
− 28,2	− 6 945	− 22,1	− 12 010	− 22,4	− 11 450
− 31,55	− 9 660	− 27,0	− 13 100	− 27,8	− 12 540
− 36,05	− 11 460	− 33,05	− 14 070	− 33,45	− 13 360
− 45,7	− 13 130	− 43,05	− 15 080	− 44,0	− 14 330
− 61,55	− 14 565	− 59,65	− 15 900	− 60,3	− 15 175
$\mathfrak{B}_{rem}$ . . . . . =	10 520		9 900		9 620
$\mathfrak{H}_c$ . . . . . =	21,4		6,08		6,12
$\mathfrak{E}$ . . . . . =	41 180		19 330		18 130

Auch diesmal füge ich beim Vergleich der Ergebnisse die prozentualen Zu- und Abnahmen der Werte bei, bezogen auf den Zustand A. Die Permeabilitätskurven verlaufen nicht ganz gleichmäßig, was auf Inhomogenitäten schließen läßt, wie sie manchmal durch eine Härtung hervorgerufen werden. Diesmal zeigt Material I die niederste Permeabilitäts- und Nullkurve, II wieder die höchste. Die Größe der magnetischen Härte ist am deutlichsten aus den Hysteresisschleifen zu erkennen (Fig. 10), sie ist bei I von mittlerer Größe, bei II und III aber kaum beachtenswert. Die maximale Permeabilität von I ist 310 (— 69 Proz.), bei II und III ist sie um 103 Proz. (— 34 Proz.) und 90 Proz. (— 28 Proz.) höher. Die Induktion nimmt auch bei I für größere Felder so rasch zu, daß für $\mathfrak{H} = 80$ die früheren Werte schon fast erreicht sind. $\mathfrak{B}_{rem}$ ist bei I noch 10 520 (— 10 Proz.), bei II und III um 6 Proz. (— 27 Proz.) und 8,6 Proz. (— 23 Proz.) niedriger. $\mathfrak{H}_c$ ist bei I 21,4 (+ 340 Proz.),

bei II um 71 Proz. (— 5 Proz.) und bei III ebenfalls um 71 Proz. (— 1 Proz.) kleiner. *E* ist bei I auf 41 180 (+ 140 Proz.) gestiegen, bei II und III um 51 Proz. (— 15 Proz.) und 56 Proz. (— 18 Proz.) geringer.

Das Ergebnis ist somit:

Durch das Abschrecken ist nur das Material I wesentlich gehärtet worden, bei II und III ist der Einfluß des Ausglühens teilweise nicht einmal mehr rückgängig gemacht worden, von



Hysteresiskurven nach dem Abschrecken (Zustand C).

Fig. 10.

einer magnetischen Härte kann also nicht die Rede sein. Die magnetische Untersuchung hat daher bestätigt, daß ein größerer Vanadiumgehalt eine Härtung verhindert.

Dies rührt jedenfalls davon her, daß das Vanadium sich mit dem Kohlenstoff verbindet und dadurch den Einfluß des Abschreckens erheblich vermindert.

Bei der Rücksendung der abgeschreckten Legierungen teilte mir übrigens die Versuchsanstalt der Firma Krupp mit,

daß ihre auf Grund der J. J. Lonsdaleschen Angaben unternommenen Versuche, Vanadium zur Herstellung permanenter Magnete zu verwenden, völlig ergebnislos verliefen, da die Härtung selbst bei einem Material von derselben chemischen Zusammensetzung wie das von Lonsdale nicht gelang.

Es steht deshalb außer Zweifel, daß Vanadium allein zur Herstellung von Magnetstahl unbrauchbar ist. Überhaupt kann von einem *Vanadium-„Stahl"* in magnetischer Hinsicht unter diesen Umständen kaum gesprochen werden.

Auch mit dieser Feststellung steht J. J. Lonsdales Untersuchung im glatten Widerspruch. Seine Werte für den gehärteten Zustand und die prozentualen Unterschiede von III C sind: $\mu_{max} = 122$ für $\mathfrak{H} = 70$ (+ 390 Proz. für $\mathfrak{H} = 12{,}5$), für $\mathfrak{H} = 80$ wird $\mathfrak{B}_{max} = 9\,500$ (+ 65 Proz.), $\mathfrak{B}_{rem} = + 7\,000$ (+ 37 Proz.), $\mathfrak{H}_c = 42$ (— 86 Proz., also nur $^1/_7$ seines Wertes), $E = 95\,000$ (— 81 Proz.).

Wenn man sich seine merkwürdigen Zahlen zu erklären sucht, so kann man möglicherweise daran denken, daß bei dem aus Eisen und Ferrovanadium hergestellten Ring das V teils direkt, teils in Form eines Doppelkarbids an das Fe gebunden war, wobei eine größere Menge C vom Vanadium unbelästigt blieb und die Härtung ermöglichte. Hierfür sprechen auch die nur Perlit und Martensit, aber kein Ferrit zeigenden Mikrophotogramme Lonsdales. Auf jeden Fall hat das Vanadium seine eigentlichen metallographischen Eigenschaften hier nicht gezeigt. Inwieweit eine mangelhafte Herstellungsweise und eine unzweckmäßige Wärmebehandlung an der durchweg niederen Magnetisierbarkeit schuld sind, läßt sich aus seinen Angaben leider nicht ersehen. So wäre einerseits durch den geringen Gehalt an freiem Fe die schlechte Magnetisierbarkeit und andererseits durch einen hohen C-Gehalt die magnetische Härte erklärbar.

14. Magnetisierbarkeit der abermals geglühten Legierungen (D) und Zusammenstellung der Messungsergebnisse.

Um festzustellen, in wieweit die Wirkung des Abschreckens wieder rückgängig gemacht werden kann, ließ ich die Le-

gierungen wie früher (bei B, Abschnitt 12) eine Stunde bei 900° im Stickstoffstrom glühen und langsam erkalten.

Die Prüfung ergab schon bei den Vorversuchen, daß die Magnetisierbarkeit nicht nur bei II und III, sondern auch bei I wieder ebenso groß war, wie beim ausgeglühten Zustand B. Da sich also nichts Neues dabei ergeben konnte, so unterließ ich die ausführliche Untersuchung.

J. J. Lonsdale findet nach dem abermaligen Ausglühen seiner Legierung, daß die Härtung etwas zurückging, doch werden die früheren Werte nicht mehr erreicht. Dies ist bei seinem Material, bei dem das erste Ausglühen schon verschlechternd wirkte, nicht sehr erstaunlich. Auf jeden Fall kann auch diese Erscheinung nicht durch das Vanadinm bedingt sein.

Zusammenfassend läßt sich also sagen, daß der Einfluß des Vanadiums auf die Magnetisierbarkeit des Eisens ein solcher ist, wie er auf Grund seiner metallographischen Eigenschaften erwartet werden konnte: Es wirkt in geringen Mengen durch Bindung von Kohlenstoff und Sauerstoff günstig und verhindert in größeren Mengen eine Härtung, ja überhaupt eine wesentliche Änderung der magnetischen Eigenschaften durch thermische Behandlung. Die von J. J. Lonsdale aus seinen Messungen gezogenen Schlüsse sind sämtlich als hinfällig zu betrachten, insbesondere können die Vergleiche mit anderen Legierungen, besonders Magnetstählen nicht aufrecht erhalten werden.

Da meine untersuchten Legierungen sich weder durch besonders leichte oder hohe Magnetisierbarkeit, noch durch magnetische Härte auszeichnen, so kann ich davon absehen, sie mit andern Legierungen zu vergleichen. Doch seien zum Schluß die wichtigsten Messungsergebnisse mit den gewählten Abkürzungen tabellarisch zusammengestellt.

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, daß bei den Eisen-Vanadiumlegierungen μ_{max} erst bei verhältnismäßig hohen Feldstärken erreicht wird, ferner verlaufen auch die Nullkurven bis etwa 3 Gauß ziemlich flach, um dann rasch anzusteigen.

Tabelle 18.

Messungsergebnisse der Nullkurven.

Material	Zustand	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}_{max}$	μ_{max}	bei $\mathfrak{B}$	und $\mathfrak{H}$
I	A	81,0	15 960	1 010	8 400	8,4
	B	79,6	16 780	1 210	8 500	7,1
	C	81,2	15 460	310	9 600	30,8
II	A	78,8	16 890	955	10 200	10,8
	B	79,4	16 850	1 230	10 300	8,4
	C	80,1	16 600	630	7 500	12,0
III	A	80,5	16 220	830	8 500	10,2
	B	80,7	15 800	1 085	9 500	8,8
	C	82,0	15 690	595	7 500	12,5

Tabelle 19.

Messungsergebnisse der Hysteresisschleifen.

Material	Zustand	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}_{max}$	$\mathfrak{B}_{rem}$	$\mathfrak{H}_c$	E
I	A	30,9	14 310	11 440	4,85	12 200
	B	31,55	14 920	11 330	4,00	10 970
	C	32,7	10 430	7 230	14,4	20 040
	A	80,3	16 140	11 720	4,91	17 100
	B	82,3	16 750	11 600	4,01	16 000
	C	80,6	15 440	10 520	21,4	41 180
II	A	30,8	14 970	12 920	6,09	16 050
	B	30,65	15 330	14 080	5,50	14 570
	C	29,1	13 360	9 360	6,05	14 220
	A	83,0	16 870	13 540	6,41	22 800
	B	81,6	16 850	14 530	5,55	20 100
	C	77,7	16 570	9 900	6,08	19 330
III	A	31,6	14 180	11 530	6,04	15 070
	B	31,55	14 420	13 000	5,49	13 880
	C	29,8	12 800	8 650	6,10	13 190
	A	80,2	16 150	12 460	6,18	22 100
	B	80,4	15 920	13 610	5,60	19 800
	C	79,8	15 700	9 620	6,12	18 130

15. Zusammenfassung.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind:

1. Bau eines Torsionsmagnetometers, das folgende Vorteile besitzt: Weitgehende Störungsfreiheit, kleine und starke Magnetsysteme, günstig wählbare Luftdämpfung, Transport-

fähigkeit und bequeme Aufstellung, einfache mechanische Konstruktion, geringe Herstellungskosten, höchste Empfindlichkeit und größter Verwendungsbereich.

2. Bei stufenweiser Magnetisierung ist für kleine Feldstärken die Größe der Stufen von Einfluß auf die Größe der erreichten Induktionswerte, die letzteren werden umso höher, je größer die Stufen sind. Für mittlere Felder ist der Einfluß geringer und für große verschwindet er ganz. Die Stufenfolge muß daher bei vergleichenden Messungen an verschiedenem Untersuchungsmaterial für kleine Feldstärken ähnlich gewählt werden.

3. Die Koerzitivkraft wird größer mit kleiner werdenden Stufen, dabei nimmt sie prozentual umso mehr zu, je kleiner sie selbst ist.

4. Der Einfluß des Vanadiums auf die Magnetisierbarkeit des Eisens kann insofern ein günstiger genannt werden, als Vanadium eine große Verwandschaft zum Kohlenstoff und Sauerstoff hat und sich deshalb leicht mit diesen Gasen verbindet, wodurch ihr Einfluß auf die Magnetisierbarkeit des Eisens in seiner Schädlichkeit gemildert wird. Die maximale Permeabilität tritt aber erst bei verhältnismäßig großer Feldstärke auf.

5. Durch Ausglühen werden die Vanadiumlegierungen magnetisch etwas weicher.

6. Eine Härtung von Legierungen mit höherem Vanadiumgehalt ist unmöglich, daher können sie auch zur Herstellung permanenter Magnete nicht in Betracht kommen.

7. Die von J. J. Lonsdale aus seinen Messungen gezogenen Schlüsse über den Einfluß des Vanadiums auf die Magnetisierbarkeit des Eisens sind sämtlich als hinfällig zu betrachten, insbesondere gilt dies auch für seine Vergleiche mit anderen Legierungen, wie z. B. mit den üblichen Magnetstählen.

Es möge mir noch gestattet sein, Herrn Professor Dr. K. R. von Koch meinen herzlichsten Dank auszusprechen für das wohlwollende Interesse, das er für die vorliegende Arbeit

zeigte, und für die Bereitwilligkeit, mit der er mir die Mittel des Instituts und der Robert Bosch-Stiftung zur Ausführung der Arbeit zur Verfügung stellte.

Ferner möchte ich nicht versäumen, auch Herrn Dr. H. Hörig an dieser Stelle für manchen praktischen Wink, den er mir gegeben hat, bestens zu danken.